

제 3 차 년 도
최 종 보 고 서

공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술 개발

Development of Optical Computing Techniques
Based on the Spatial Optical Modulator

연구기관
한국과학기술연구원

과 학 기 술 처



제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 “ 공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술개발 ” 에 관한 연구의 최종 보고서로 제출합니다.

1993년 11월 일

연구기관명 : 한국 과학 기술 연구 원

연구책임자 : 조 재 철 (정보전자 연구부 책임 연구 원)

연구 원 : 손 정 영 (정보전자 연구부 책임 연구 원)

이 상 배 (정보전자 연구부 선임 연구 원)

김 상 혁 (정보전자 연구부 연구 원)

전 형 욱 (정보전자 연구부 연구 원)

최 용 진 (정보전자 연구부 위촉 연구 원)

박 성 식 (서강대 물리학과 위촉연구조원)

여 백

요 약 문

I. 제 목

공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

1. 목 적

공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술 개발

- 공간 광소자를 이용한 연산 및 패턴인식 기술개발
- 광 Novelty Filter 제작
- 패턴인식 알고리즘 개발
- 광정보 처리 기술확립

2. 중 요 성

- 광연산, 신호 및 정보처리 등 광컴퓨터 구현을 위한 기본적인 구성블럭 실현
- 실시간으로 인식처리되는 광학적 영상처리방법 구현

- 초정밀 광계측기기의 국산화를 위한 기반기술로 이용
- 전기적 신호의 광신호 변환기로 활용
- 수출전략 산업의 생산성 향상 및 공장자동화에 활용
- 무인 자동 이동 시스템 개발 및 로봇틱 비전에 활용
- 군사적 침단인식 및 추적 시스템 개발에 응용
- 이동물체 영상식별 및 광응용 표적 자동 추적 시스템의 기반기술로 응용
- 저가격 LCTV를 이용한 광학적 영상처리 기술 구현

III. 연구개발의 내용

- 광굴절성 결정을 이용하는 적분 및 미분 기술확립
- 공간 필터에 의한 위상 물체의 식별 및 영상처리 기술확립
- 행렬 변환 기술 개발
- 광굴절성 결정을 이용하는 광스위치 기술 개발

IV. 연구개발의 결과 및 활용에 대한 건의

- 광굴절성 결정 $BaTiO_3$ 을 이용하는 광 위상공액파의 발생과 이의 광정보처리 응용을 연구하였다.

- 두 빔 결합에 의한 OPC를 연구하였다.
- 두 빔 결합에 의한 OPC는 빠른 반응시간, 낮은 반응 에너지, 우수한 해상도, 안정성 등의 특성을 갖고 있다.
- 두 빔 결합에 의해 전방향 및 수직방향의 Edge Enhancement가 된다.
- 두 빔 결합에 의한 OPC의 응용으로 Michelson 형 간섭계와 광파이버를 통한 광정보 전송을 연구하였다.
- 광굴절성 결정의 기억소자로서의 연구로 수 초에서 수백 초의 기억시간을 알았다.
- 광정보처리용 홀로그래피 소자에 대한 연구로 기억소자, 광스위치용 광 Interconnection 소자 등의 소자를 제작하였다.
- 행렬-행렬 연산을 광굴절성 결정을 이용한 방법과 홀로그래피 소자를 이용한 방법을 연구하였다.
- 두 빔 결합에 의한 OPC로 반응기간이 더 빠른 Novelty Filter를 구성하였다.
- 이 연구결과는 광산업 기술에 활용할 수 있는 기본적인 광기술로 기여할 수 있다.

여 백

SUMMARY

I. Title

- Development of Optical Computing Techniques Based on the Spatial Optical Modulator

II. Objective and Significance of the Study

1. Objectives

- Development of Optical Computing Techniques Using Spatial Light Modulators
- Development of Real-time Optical Image Processing Technology Using Spatial Light Modulators
- Establishment of a Technical Basis for the Optical Novelty Filter
- Development of Real Time Optical Pattern Recognition Techniques

2. Significance

- Establishment of a Basic Configuration for Optical Computing; Optical Signal Processing, Optical Information Processing
- Realization of Real Time Optical Image Processing Techniques
- Establishment of a Technical Basis for the Very Precise Optical Instrumentation
- Improvement of Industrial Production and Factory Automation
- Development of a Fully Automated Moving System and a Robotic Vision
- Development of a New Target Detecting and Tracking System for Military Use
- Establishment of Real Time Optical Image Processing Technology Based on Low Priced Spatial Light Modulators

III. Contents and Scope of the Study

- Development of Integration and Differential Techniques

Based on Photorefractive Crystal

- Realization of Real Time Phase Image Detecting System Using Spatial Filter
- Development of Matrix-Matrix Multiplication
- Development of Optical Switching Techniques Based on Photorefractive Crystal

IV. Results and Recommendation

- Characteristics and applications of a optical phase conjugation were investigated for optical information processings
- Characteristics of two-wave mixing were investigated
- Optical phase conjugation of two-wave mixing has rapid response time, low energy density, high quality, and high stability
- Optical phase conjugation of two-wave mixing can do directional and totally directional edge enhancement of optical image
- Michelson type interferometer and optical image

transmission by using optical fiber were done as applications of two-wave mixing

- Optical memory of photorefractive crystals were investigated
- Holographic devices were investigated for optical information processings
- Matrix-matrix multiplication by using photorefractive crystal and by using holographic devices were investigated
- Novelty filter system were constructed by using two-wave mixing and the system has more fast response time than SPPC system
- Above expermental results will be useful for the development of optical techniques anda optical computing system

CONTENTS

CHAPTER 1. Introduction	15
CHAPTER 2. Characteristics of Photorefractive Crystal for Optical Computing	18
Section 1. Liquid Crystal TV	18
Section 2. Parameters of Crystal and System in Optical Computing	19
Section 3. Applications of Photorefractive Crystals	24
CHAPTER 3. Optical Information Processing Using Optical Phase Conjugation	26
Section 1. Optical Phase Conjugation Using Two-wave Mixing	26
Section 2. Applications of Optical Phase Conjugation Using Two-wave Mixing	37
Section 3. Optical Information Processing Using Holographic Devices	53

Section 4. Real Time Image Processing of Novelty Filter	76
CHAPTER 4. Conclusion	85
REFERENCES	88

목 차

제 1 장 서 론	15
제 2 장 광컴퓨팅을 위한 액정 TV와 광굴절성 결정	18
제 1 절 액정 TV	18
제 2 절 결정 및 시스템 파라미터	19
제 3 절 광굴절성 결정의 응용	24
제 3 장 OPC를 이용한 광 정보 처리	26
제 1 절 두 빔을 이용한 OPC	26
제 2 절 두 빔을 이용한 OPC의 응용	37
제 3 절 홀로그래프 OPC를 이용한 광정보 처리 기술	53
제 4 절 Novelty Filter를 이용한 광정보 처리	76

제 4 장 결 론	85
참 고 문 헌	88

제 1 장 서 론

광의 고유 특성인 병렬성, 저잡음성 등을 이용한 광연산, 영상 및 신호처리 등의 정보처리와 광컴퓨터 구현을 위해 많은 연구가 되고 있다. 광기술의 하나인 비선형 광학은 광매질 (e.g., 광굴절성 결정)의 비선형성을 이용하는 것으로 매질의 내부로 입사되는 빔 (beam)의 특성인 위상(phase), 편광성 (polarization), 세기 (intensity), 전파방향 (direction of propagation), 주파수(frequency) 등을 다른 빔으로 조절할 수 있게 된다. 이런 비선형 광학은 광컴퓨팅의 구성 요소인 공간 영역에서의 4차원 interconnection, 영상의 병렬식 가감산, 위상공액, 광메모리, 광변조소자 구현을 위해 중요한 역할을 한다.

광굴절성 결정을 이용하는 비선형 광학의 한 분야로서 optical phase conjugation(OPC)은 입사파를 광굴절성 결정 특성에 의해 입사파의 복소공액을 취한 출력파로 위상이 반전된 이 출력파는 그 입사광의 경로를 정확히 역진행하여 광학 시스템에서의 수차, 광전파 경로상에 놓인 diffusive 매질에 의한 퍼짐이나 왜 (distortion)를 보상할 수 있다. OPC의 위상공액 특성을 이용하여 광연산 (optical computing), 광패턴인식, 광영상인식, novelty filter에 의한 시공간 신호처리 등을 수행할 수 있게 된다⁽¹⁾. 디지털 컴퓨터의 장점인 정확성 (accuracy), 프로그래밍의 융통성 (programming flexibility), 제어능력 (control)을 이용하여 OPC에 의해 수행할 수 있는 유사한 기능의 계산이나 영상 및 신호처리를 수행할 수도 있다. 그러나 기술된 응용을 최적화하기

위해서는 시스템의 대량의 병렬성 (massive parallelism)과 high speed가 크게 요구되는데 이를 위해 이러한 기본 특성을 가지는 광학시스템에 의한 정보처리나 광컴퓨팅 기술 개발이 크게 요구되고 있다.

기술된 대량의 병렬성과 high speed와 같은 광컴퓨팅을 위한 기본 요소 뿐만이 아니라 광컴퓨팅의 핵심요소인 neural network과 이의 작동 원리에 대한 개념은 광컴퓨터 구현에 큰 역할을 하고 있다. 한 예로 인간의 두뇌는 데이터를 병렬처리와 thresholding operation을 기본으로 하는 연상기억(associative memory) 방식으로 처리를 하는 것으로 알려져 있으며 주목할만한 오류정정 능력 (error correction capability)을 가지고 부분 정보로부터 신경망의 interconnection에 기억되어 있는 패턴 및 영상의 인식과 추출이 가능하다. 광학 기술을 이용하여 초고속, 초병렬로 동작하는 지능형 computer의 구현이 광컴퓨팅 분야의 한 목표로 되고 있으며 이를 위한 요소 기술로 현재 개발되고 있는 것은 비선형 광학소자로 공간 광변조기, 광역치 소자(optical thresholding device), 광배선 소자(optical interconnection device)가 있으며 광 회로망의 구현은 이런 개별소자를 이용한 광벡터 행렬 곱셈기에 의한 방식과 홀로그래름을 이용한 방식 및 이들을 compact하게 집적화하는 방식 등으로 구성하고 있다. 이중에서 지금까지 연구된 홀로그래름 연상기억 광학계는 광굴절성 결정의 위상공액 특성을 이용하는 것과 레이저 공진기의 개념을 이용한 광굴절 링공진기, novelty filter 등을 이용한 광학시스템 등이 제안되고 있다. 현재 OPC에 의한 광정보 및 신호처리, 광연산 등 산업, 항공, 의학계 등 과학

전반에 걸쳐 광컴퓨팅 기술 확보를 위해 다양한 연구가 진행 중에 있다.

공간 광소자의 개념은 1960년대의 Holography 나 Fourier 변환특성의 인식과 더불어 시작되었다고 할 수 있으나, 실제 활발한 연구활동은 공간 광소자가 상용화된 1980년대 이후 수행되었다. 현재 공간 광변조기는 패턴인식, 영상이해 및 처리, 광연산, 전기신호의 광신호로 변환, 메모리, programmable 공간 필터링, 고속 비선형 스위치, 실시간 홀로그램 등 고속 정보처리를 위해 요구되는 모든 기능의 수행가능성을 보여주고 있고, 또한 일부는 실험실적인 시작품 제작단계까지와 있으나, 아직까지 대부분의 기술은 기초개념의 정립단계를 벗어나지 못하고 있다.

본 연구는 광굴절성(Photorefractive) 결정과 LCLV(Liquid Crystal Light Valve)나 LCTV(Liquid Crystal TV)를 이용한 영상처리 및 광연산 기술의 개발에 대한 연구수행을 목적으로 하였다. 제 2장에서 광정보 처리용 액정 TV와 광굴절성 결정인 $BaTiO_3$ 의 특성 및 시스템을 사용시에 고려하여야 할 변수 등을 기술하였고 이의 응용성에 대해서도 기술하였다. 제 3 장에서는 제 1차년도, 2차년도의 연구에 이어서 비교적 쉽게 안정된 위상공액파를 얻을 수 있는 광굴절성 결정 $BaTiO_3$ 의 위상공액파 발생현상을 이용하여 광컴퓨팅에 OPC를 응용하기 위한 연구를 기술하였다. 광메모리와 광 interconnection에 대한 연구도 기술하였으며 광정보 처리기술에서 이의 응용 가능성을 알아 보았다.

제 2 장 광컴퓨팅을 위한 액정 TV와 광굴절성 결정

제 1 절 액정 TV

현재 공간 광변조기는 패턴인식, 영상이해 및 처리, 광연산, 전기 신호의 광신호로 변환, 메모리, programmable 공간 필터링, 고속 비선형 스위치, 실시간 홀로그래프 등 고속 정보처리를 위해 요구되는 모든 기능의 수행가능성을 보여주고 있어 많은 연구가 수행이 되고 있다. 그러나 이같은 가능성은 고가의 공간변조소자(SLM: Spatial Light Modulator)가 사용되어야 하나 최근에 저가격의 액정 TV를 이용한 실시간 광학적 정보처리를 구현하려고 하는 연구가 진행되고 있다. 공간 변조소자를 이용하여 실시간으로 광학적인 정보처리를 하는 데에는 두 가지 측면이 있다. 하나는 CCD카메라로 입력 영상을 소자의 화면 상에 구현시키고 이곳에 가간섭 평행광을 입사시켜 가간섭성 이차원 입력 영상을 구현시키는 것이며 다른 하나는 영상 처리용 가간섭 광학계의 필터면에 즉, 공간 주파수 필터링상에 필터링이 이루어 지는 곳에 공간소자를 위치시켜서 그 화면상에 공간 주파수 필터를 재현시켜서 필터링을 하는 것이다. 따라서 공간변조소자의 분해능과 contrast는 영상처리 결과에 중요한 변수로 작용하게 된다. 일반적으로 액정 TV의 contrast는 He-Ne 레이저에 대해 10여 정도이나 상대적으로 고가품인 공간변조소자의 contrast는 수 100에서 수 1000정도이고 화소의 크기

가 더 작다. 공간변조소자의 gray 레벨은 몇 단계정도 밖에 안되며 액정 TV 역시 광학 시스템을 구성할 경우에 contrast 및 gray를 크게 고려하지 않게 구성하여야 한다.

본 연구에서는 CASIO의 모델 TV-45제품을 사용하였다(그림 1. 참고). 흑백 액정 TV이며 크기가 40mm x 60mm 이고 액정 cell의 갯수는 130 x 180 개이며 각 액정의 크기는 320 μ m x 320 μ m이었다. 일반적인 액정 TV와는 달리 반사형이므로 투과형에 비하여 쉽게 광학 시스템에 응용이 될 수 있다. 액정의 앞뒤에 있는 편광판을 제거하여 CCD 카메라에 연결하여 입력영상을 TV상에 나타나게 하였다. 편광판의 조절에 의해 최대 10:1 정도의 contrast를 나타내며 간단한 필터링 실험을 통해서 이의 유용성을 조사하였다. 그림 2와 3은 액정 TV를 이용한 실시간 edge enhancement와 가감산을 실험한 결과이다. 따라서 저 가격의 액정 TV를 이용하여 간단한 실시간 광정보처리를 위한 공간변조소자로 사용이 가능함을 알 수 있었다.

제 2 절 결정 및 시스템 파라미터

광굴절성 결정을 이용하는 비선형 광학의 한 분야로서 optical phase conjugation(OPC)은 입사파를 광굴절성 결정 특성에 의해 입사파의 복소공액을 취한 출력파로 위상이 반전된 이 출력파는 그 입사광의 경로를 정확히 역진행하여 광학 시스템에서의 수차, 광전파 경로상에 놓인 diffusive 매질에 의한 퍼짐이나 왜 (distortion)를 보상할 수

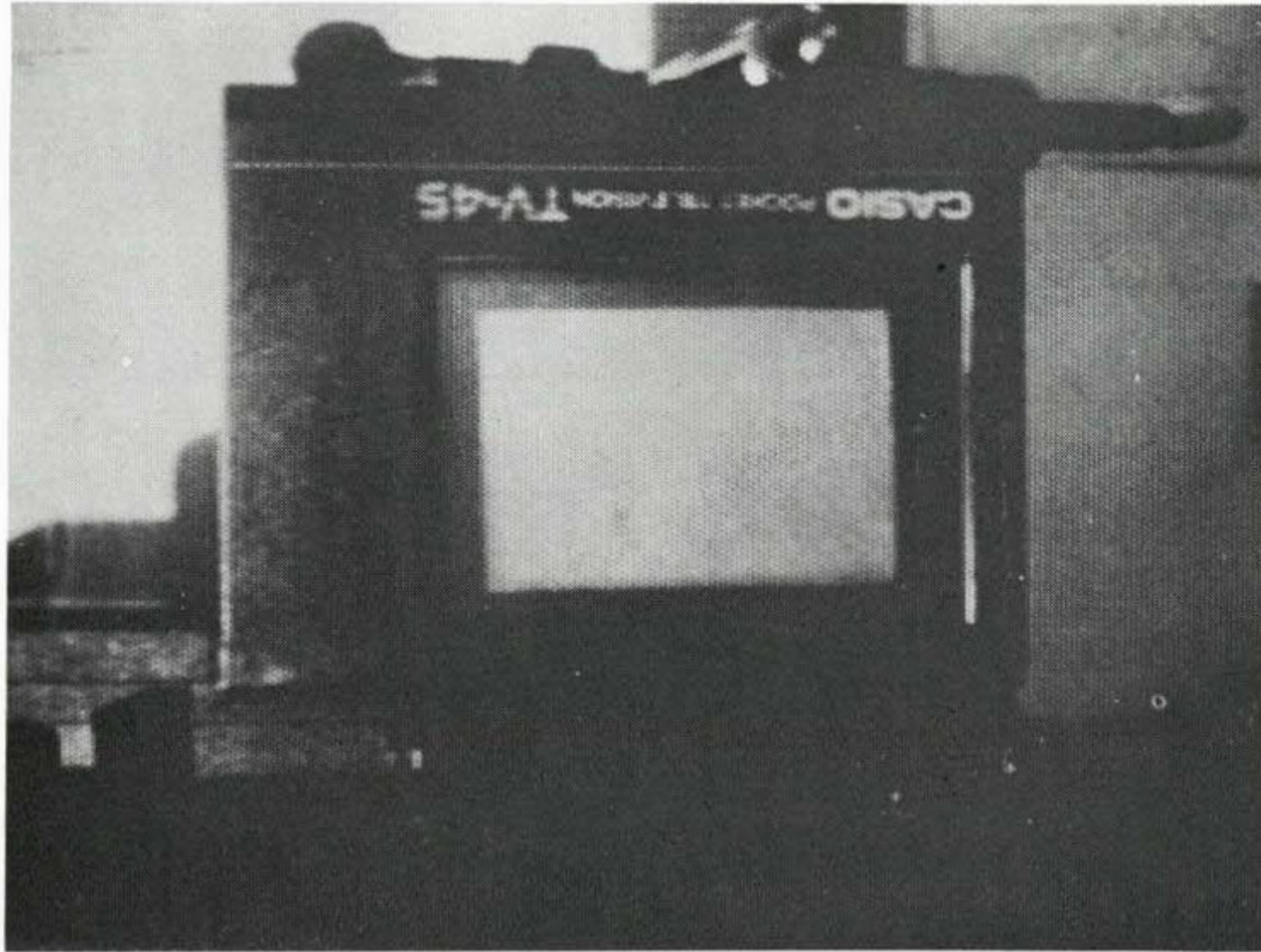
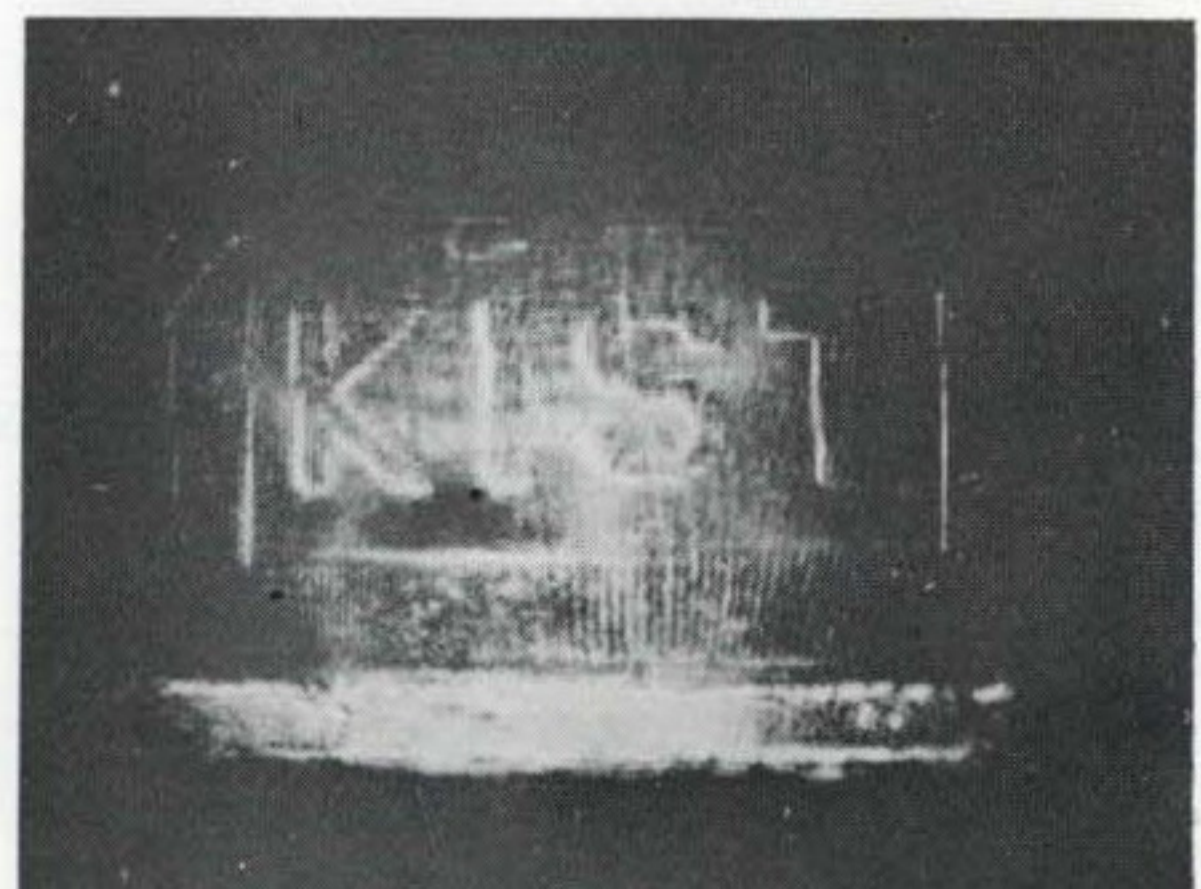
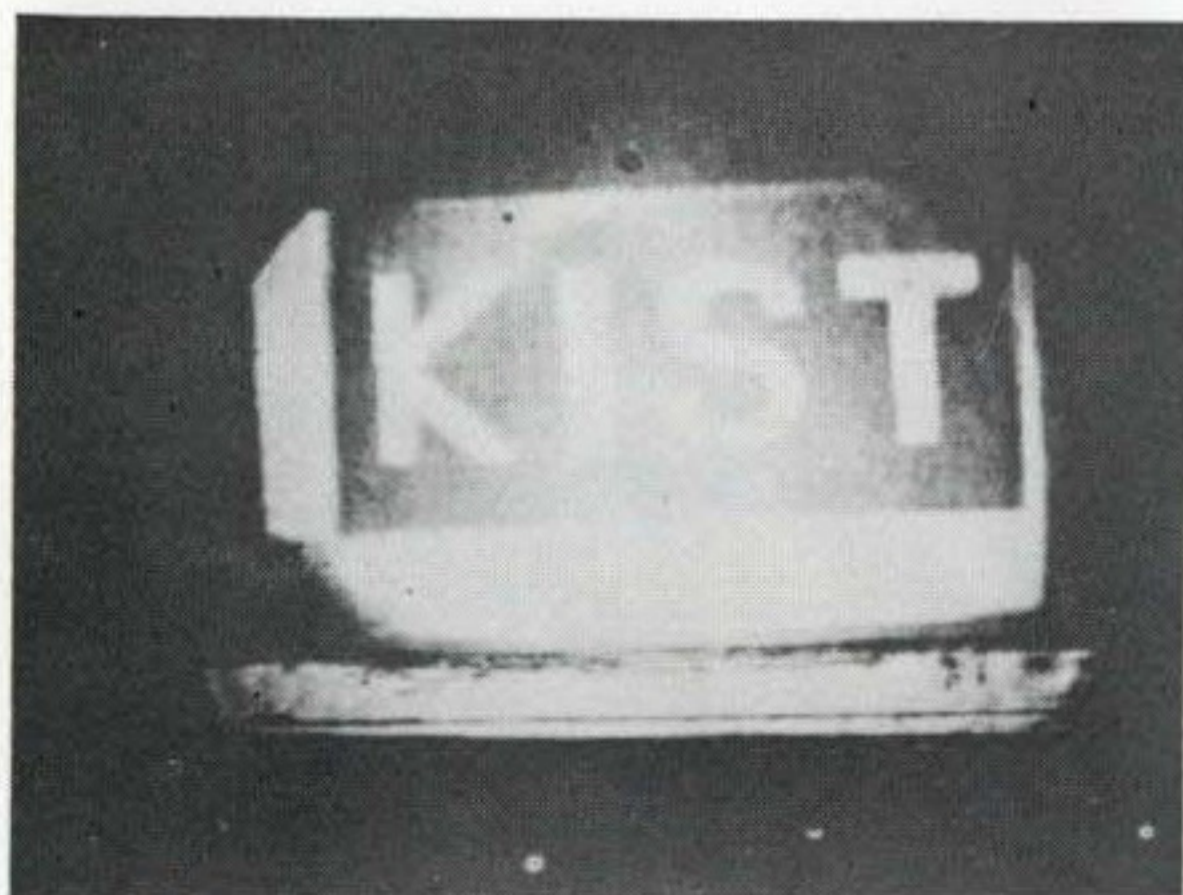
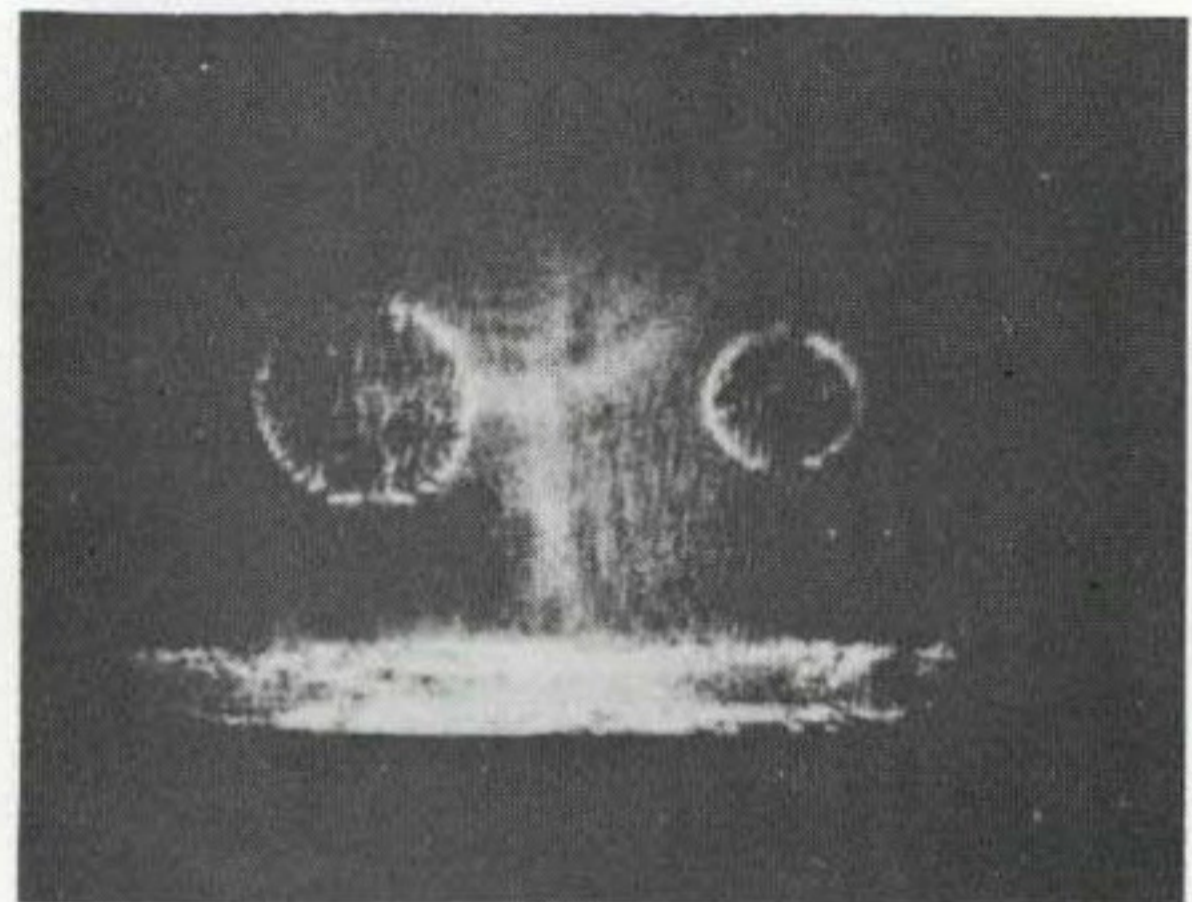
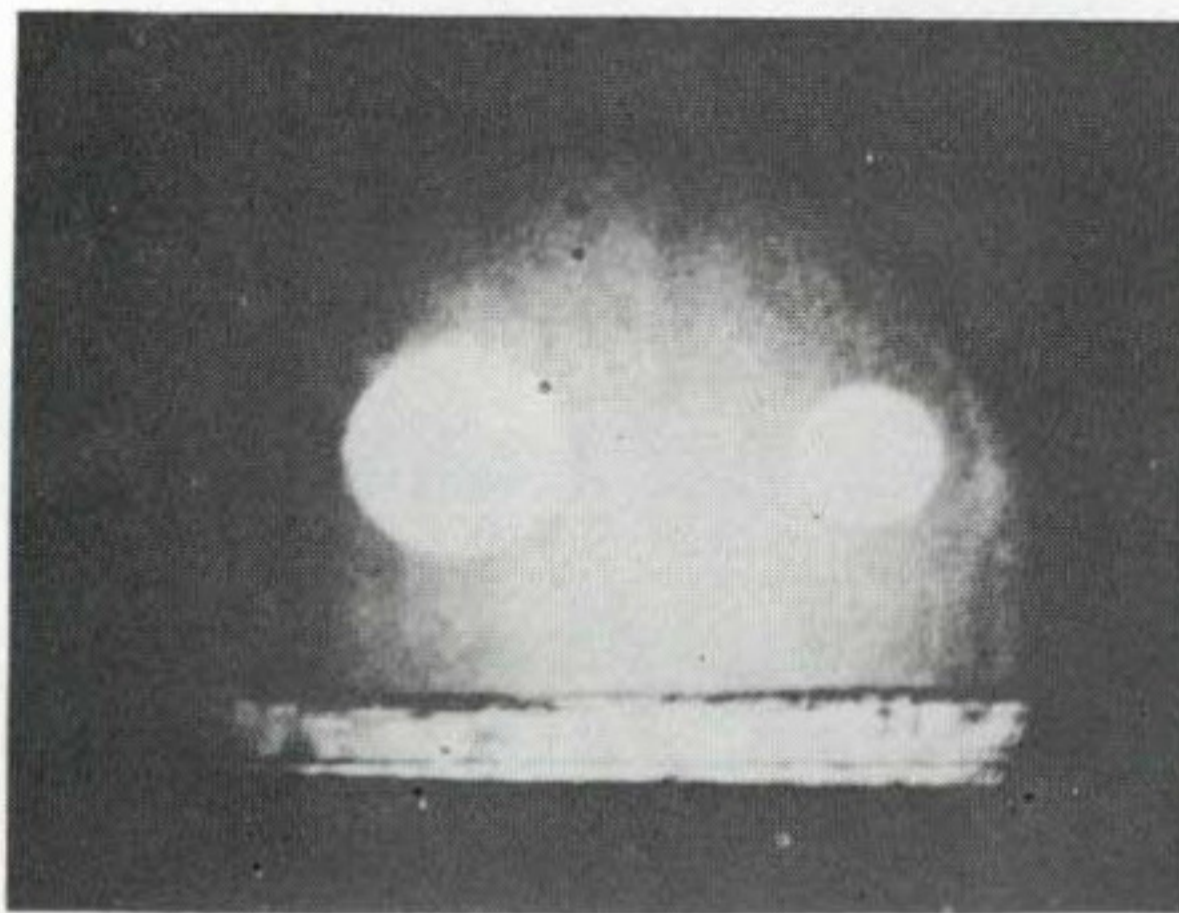


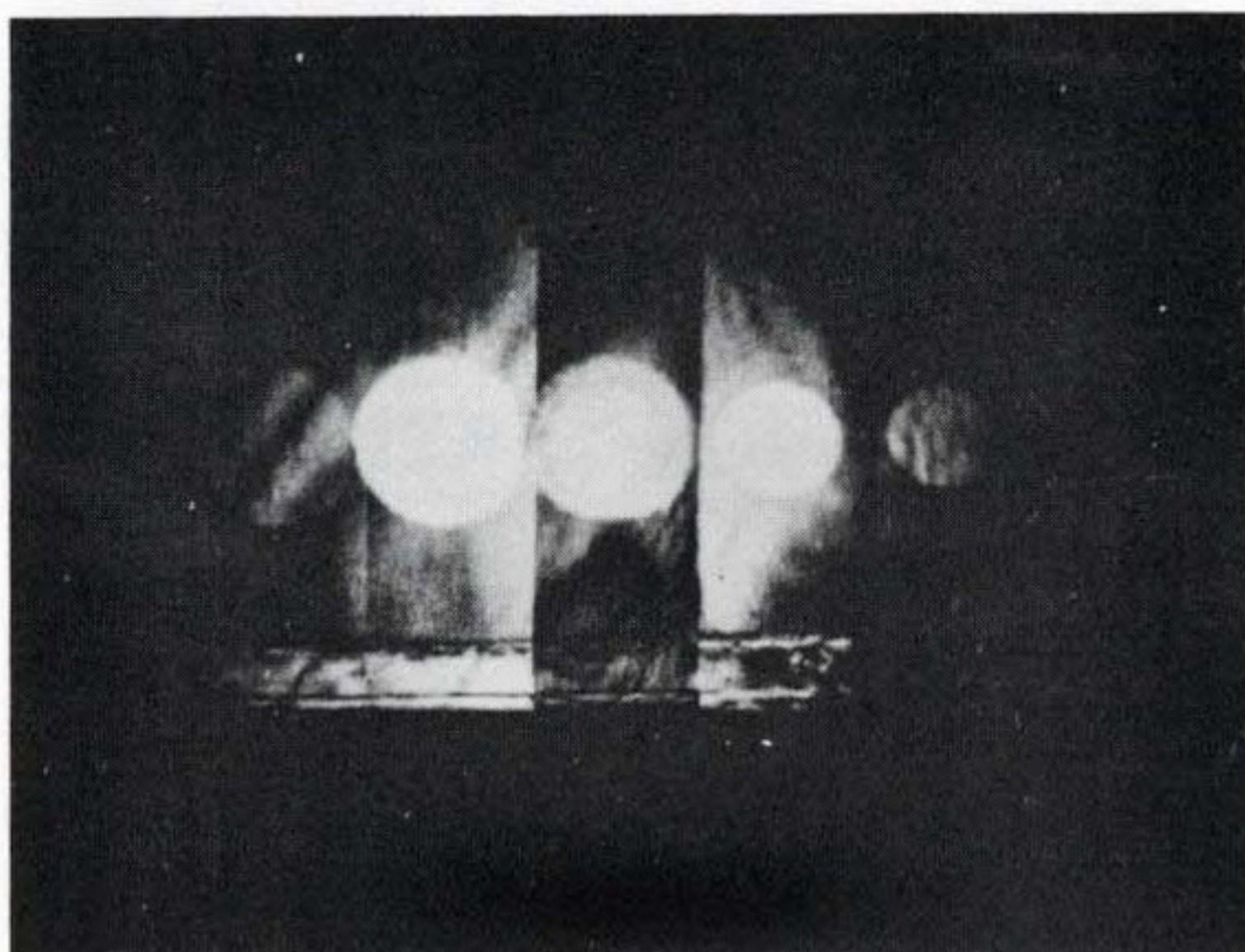
그림 1. 공간변조소자로 사용하기 위해서 개조된 액정 TV



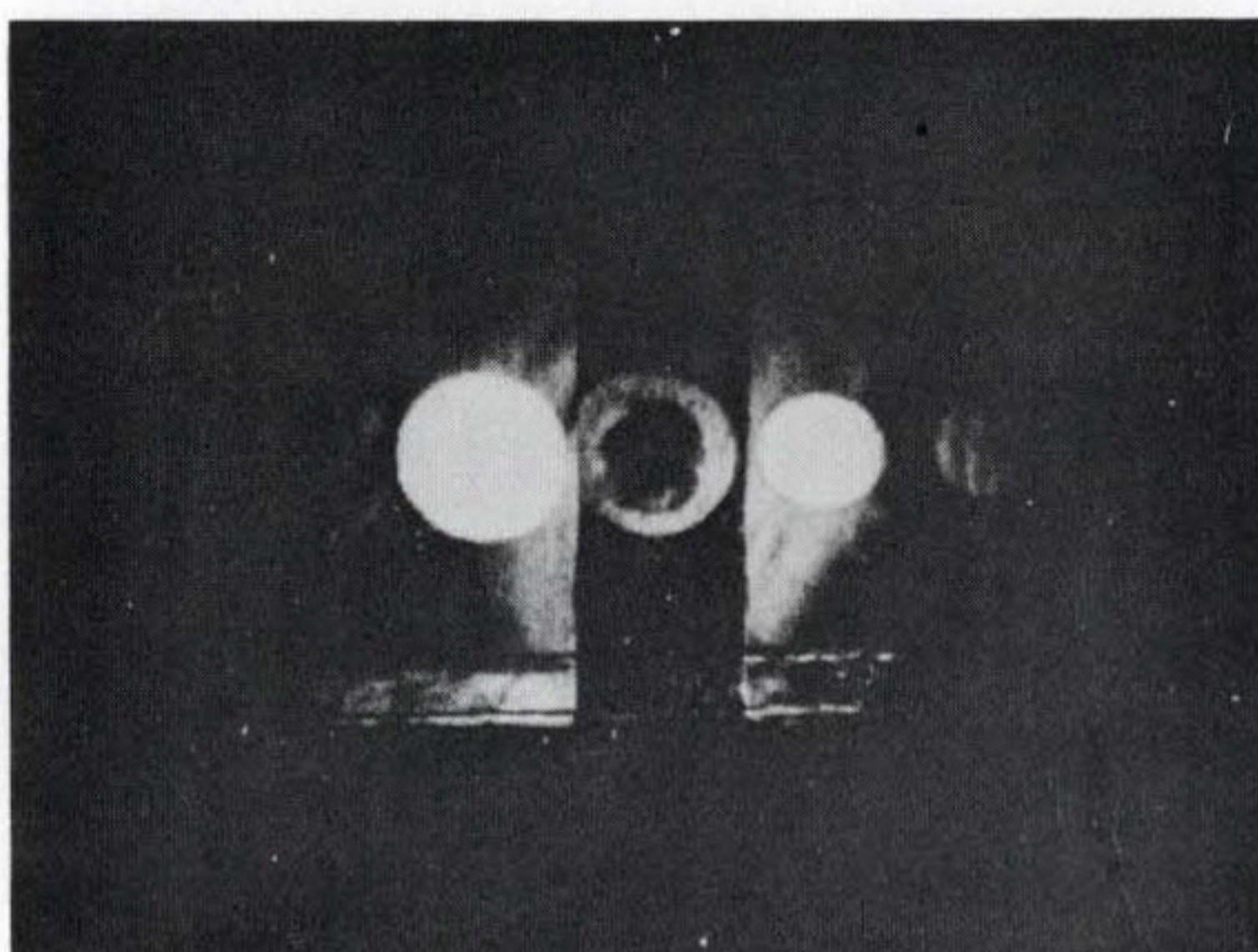
입력 영상

처리 결과

그림 2. 액정 TV를 사용하여 얻은 실시간 Edge Enhancement



상의 가산

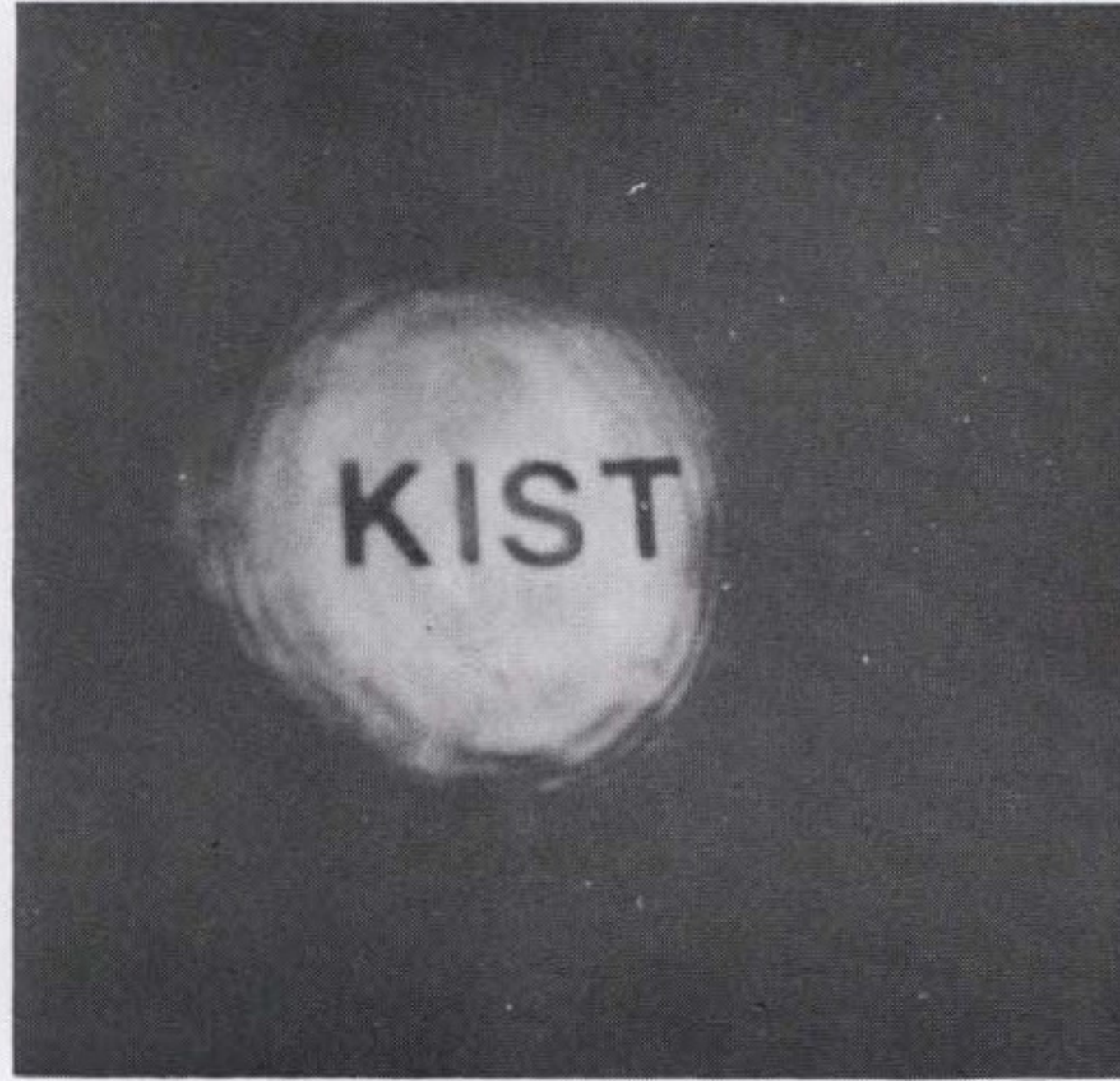


상의 감산

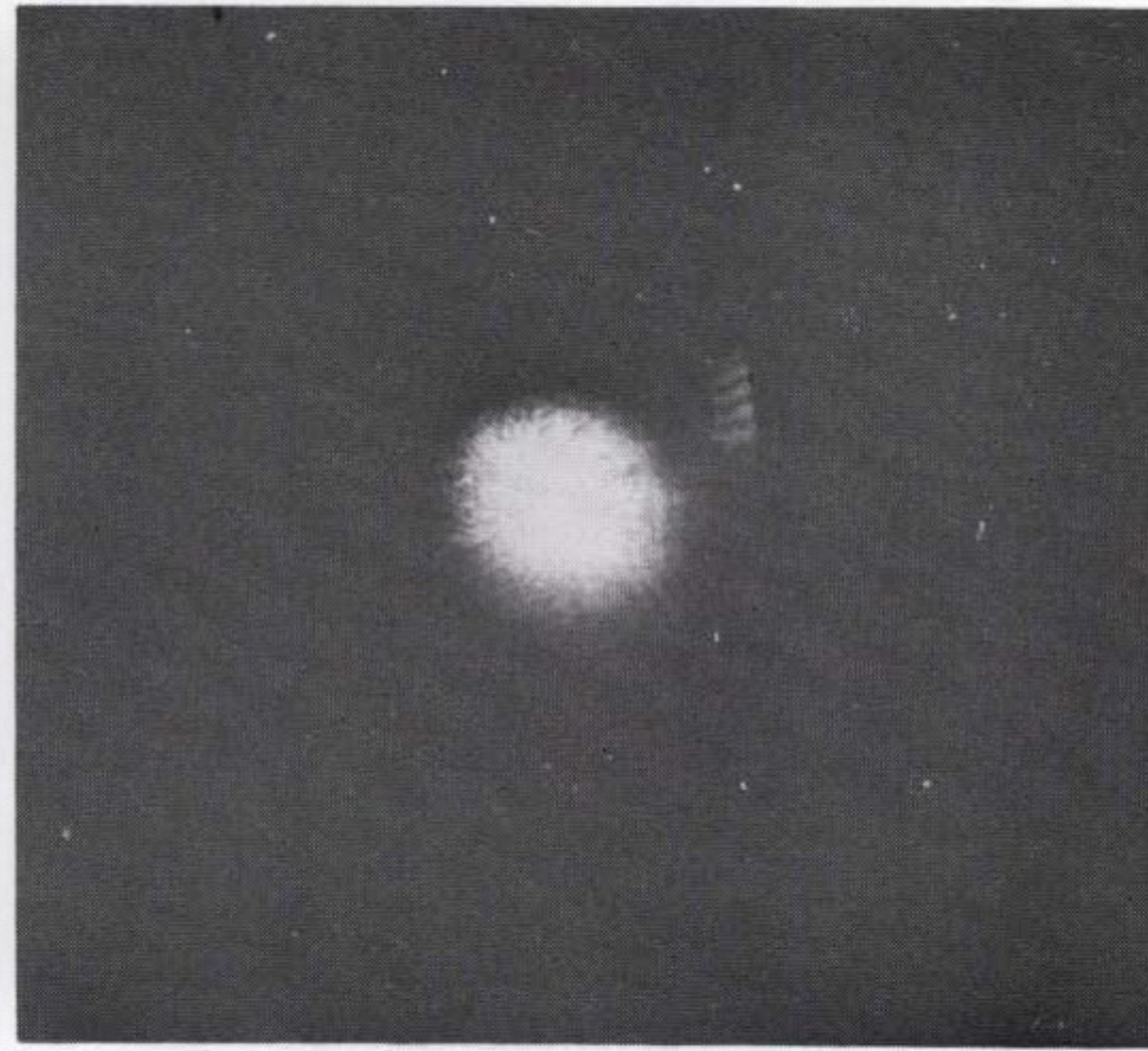
그림 3. 액정 TV를 사용하여 얻은 실시간 상의 가감산

있다. 그림 4는 광굴절성 결정에 의해 생성된 OPC의 특성을 나타내는 대표적인 결과인데 왜를 일으키는 물질에 의해서 생긴 왜곡된 영상을 그림 4의 (c)와 같이 보상하여 원하는 상을 전송할 수 있다. 이러한 OPC의 위상공액 특성을 이용하여 광연산 (optical computing), 광패턴 인식, 광영상인식, novelty filter에 의한 시공간 신호처리 등을 수행할 수 있게 된다.

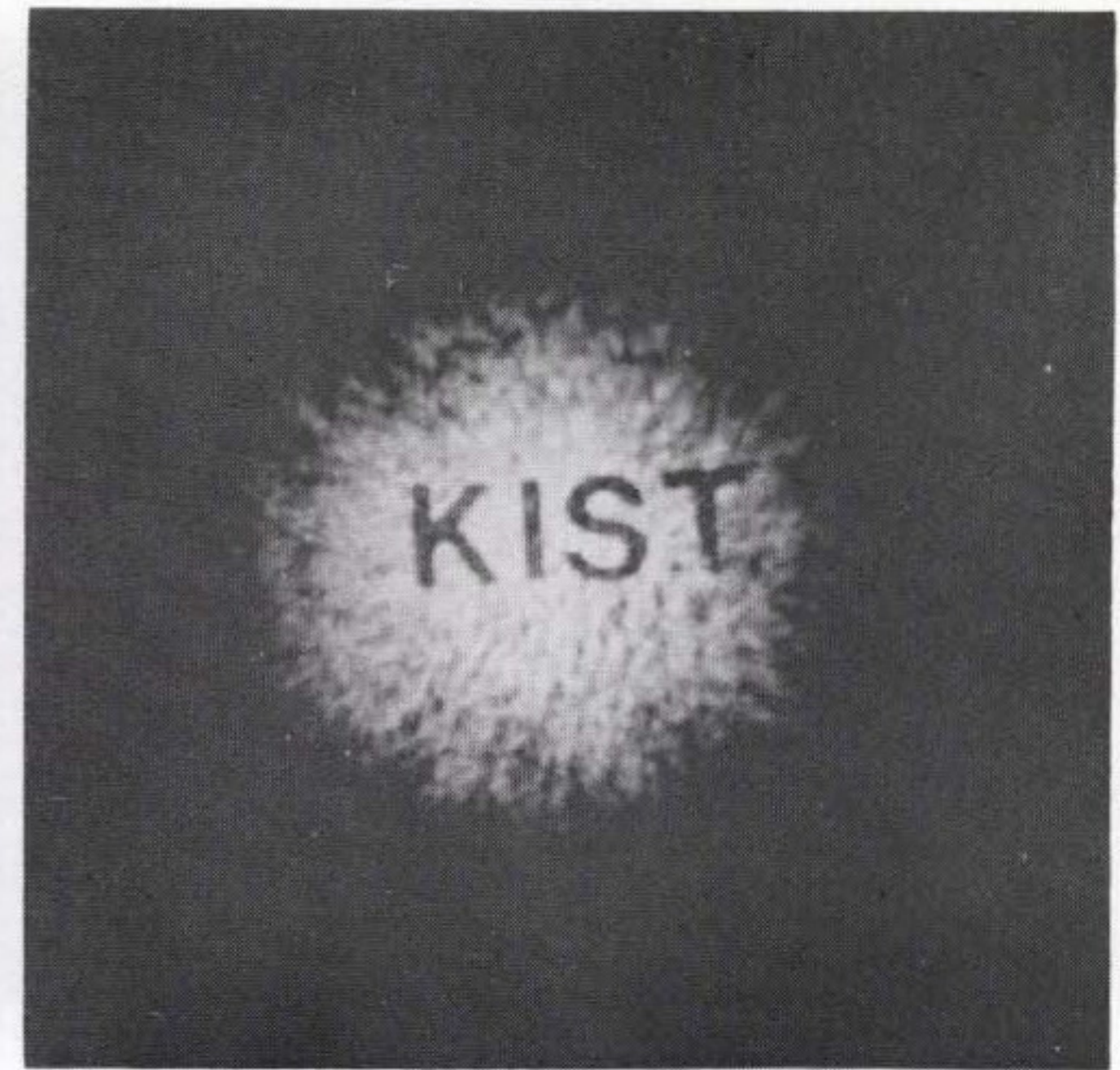
광굴절성 물질을 이용한 2차원 행렬변환과 영상필터 그리고 응용 기술 개발을 위해 미국, 소련, 구주, 일본 등지에서 많은 연구가 진행되고 있고 또한 LCLV 등의 기술은 소형 컴퓨터와 CCD 카메라의 도움에 의해 나쁜 조건하에서의 영상인식까지도 할 수 있는 단계에 와 있다⁽¹⁾. 공간 광소자 기술은 광컴퓨터의 구현만이 아니고 앞으로 광기술을 인도할 중요한 기술 중의 하나이다. 광굴절성 결정에 의해 OPC를 얻는 방법은 여러 방법이 있다. 그 근본적인 근거는 일반적으로 four wave mixing에 의한 것으로 간주되고 있으며 펌핑하는 상황에 따라 externally pumped, self pumped, mutually pumped, stimulated back scattering 등이 있다⁽¹⁾. 각 방법에 따라 그 특성도 달라지므로 일반적으로 각 시스템에 따라 위상공액기를 선택하게 된다. 가장 쉽게 비교적 낮은 광강도에서도 위상공액파를 얻을 수 있는 SPPC (Self Pumped Phase Conjugator)⁽²⁾는 BaTiO₃ 결정의 큰 광학계수로 인해 입사빔으로 부터 fanning^(3,4) 빔을 만들고, 이들 fanning 빔은 결정의 내부 반사에 의해 펌프 빔으로 작용하여 OPC를 형성한다. 따라서 SPPC는 외부 펌프빔이 필요치 않으며 낮은 광강도 (1W/cm²이하)에서



(a)



(b)



(c)

그림 4. OPC의 영상 보상

(a) 영상의 위상공액상

(b) Distorter에 의해 왜곡된 영상

(c) 왜곡된 (b)의 영상을 OPC에 의해 보정한 영상

도 20%에서 50% 정도의 높은 반사율의 복소공액 출력을 얻을 수 있다.

광컴퓨팅에 사용되는 광굴절성 결정인 BaTiO₃를 사용할때 이에 고려하여야 할 사항이 있다. 그동안 본 연구실에서 제 1차년도에 이어서 제 2차년도의 연구수행 결과 결정사용에 있어 무엇보다 먼저 고려하여야 할 사항은 사용할 환경의 조건이다.

- 1) 상전환을 방지하기 위해서 온도유지에 주의를 하여야 한다.
- 2) 결정의 편광성을 최대로 하기 위해 전기적으로든지 물리적으로든지 poling하여야 한다.
- 3) 결정의 모양은 결정의 축 방향으로 자른 것이고 육면체의 각 면은 광학적으로 깨끗하게 연마가 되어 있어야 한다.
- 4) 레이저로 되돌아 가는 것을 방지하기 위해 광 isolator를 설치 하여야 한다.

그밖에 고려해야 할 사항들과 자세한 내용은 적용되는 각 시스템에 따라서 달라지므로 제 1차년도⁽⁵⁾ 및 2차년도 연차보고서⁽⁶⁾에서 상세히 기술이 되어 있다.

제 3 절 광굴절성 결정의 응용

광굴절성 결정은 지난 70년대 이후에 주로 광정보처리나 dynamic holography, 광위상공액에 응용이 되어 왔다. 초기에 연구되었던 holographic memory는 현재 광컴퓨팅에 all-optical associative

memory로서 연구되고 있으며 nanosecond의 기록 및 재생속도로 수년 동안 기록이 가능하고 3차원 자료를 10^{12} bits/cm³까지 입력이 가능한 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 이 dynamic holographic 기록은 holographic 간섭계, image convolution 및 correlation, 패턴 인식, 병렬식 광논리, 광리소그래픽, 광 interconnection 등에 응용이 가능하여 많은 연구가 수행되고 있다. 두빔의 결합에 의해 위상의 이동에 의해 자기 회절에 의한 image의 증폭은 광신호를 처리하는 데 있어 매우 중요한 역할을 하고 있으며 four wave mixing이나 자기 펌핑으로 생긴 OPC는 레이저 resonator나 매질속을 전파하다가 손상된 파면의 보상에 응용되고 있다. 또한 공간 광변조기로서 incoherent 입력상을 coherent 상으로 변조가 가능하여 실시간 data 입력에 적용되고 있으며 그 밖에도 여러 가지 고속 정보처리를 위해 요구되는 모든 기능의 수행가능성을 보여주고 있다. 이들 응용은 광컴퓨터 개발에 매우 밀접한 관련을 갖고 있다. 광컴퓨팅에 응용되고 있는 광굴절성 결정은 근본적으로 결정의 비선형적인 특성의 개선에 달려 있지만 응용의 극대화를 위해 시스템의 최적화 노력이 필요하겠다.

제 3 장 OPC를 이용한 광 정보 처리

제 1 절 두 빔을 이용한 OPC

OPC의 기본적인 특성은 제 1차년도 및 2차년도 연구수행 결과에서 다소 언급이 되어 있다. 1차년도와 2차년도의 광굴절성 결정의 광위상공액에 대한 기초 연구는 주로 그림 5와 같이 자기 펌핑에 의한 위상공액파의 발생과 응용에 대한 것이었으며 여러 특성 중에 새로이 자기 펌핑에 의해 방향성 edge enhancement를 하는 것을 발견하여 OPC 발생의 연구 및 응용성을 연구하였다. 그림 6은 이 실험의 결과를 나타낸 것으로 수직의 성분만이 edge enhancement가 되었다. 이 결과의 이해는 새로운 OPC 발생 방법인 두 빔 결합에 의해 다소 이해할 수 있었다. 복잡한 시스템 상에서 약해진 상의 증폭을 위해 그림 7과 같이 두 빔 결합(two wave mixing)을 한다. Two wave mixing은 에너지를 전달하므로 약한 image빔을 강한 pumping빔과 상호 작용하여 상의 정보를 증폭할 수 있다⁽⁷⁾. 그림 8은 두빔 결합에 의해 image intensity 증폭을 한 실험결과로 그림 8(a)는 펌핑빔이 주어지지 않을 때 결정을 통과한 image빔으로 초기에 광의 세기가 $200\mu\text{W}$ 였으며 $2000\mu\text{W}$ 의 펌핑빔을 주어 간섭을 일으켜서 증폭한 결과 그림 8(b)와 같이 $800\mu\text{W}$ 였다. Two wave mixing의 효과를 높이려면 두 빔의 결

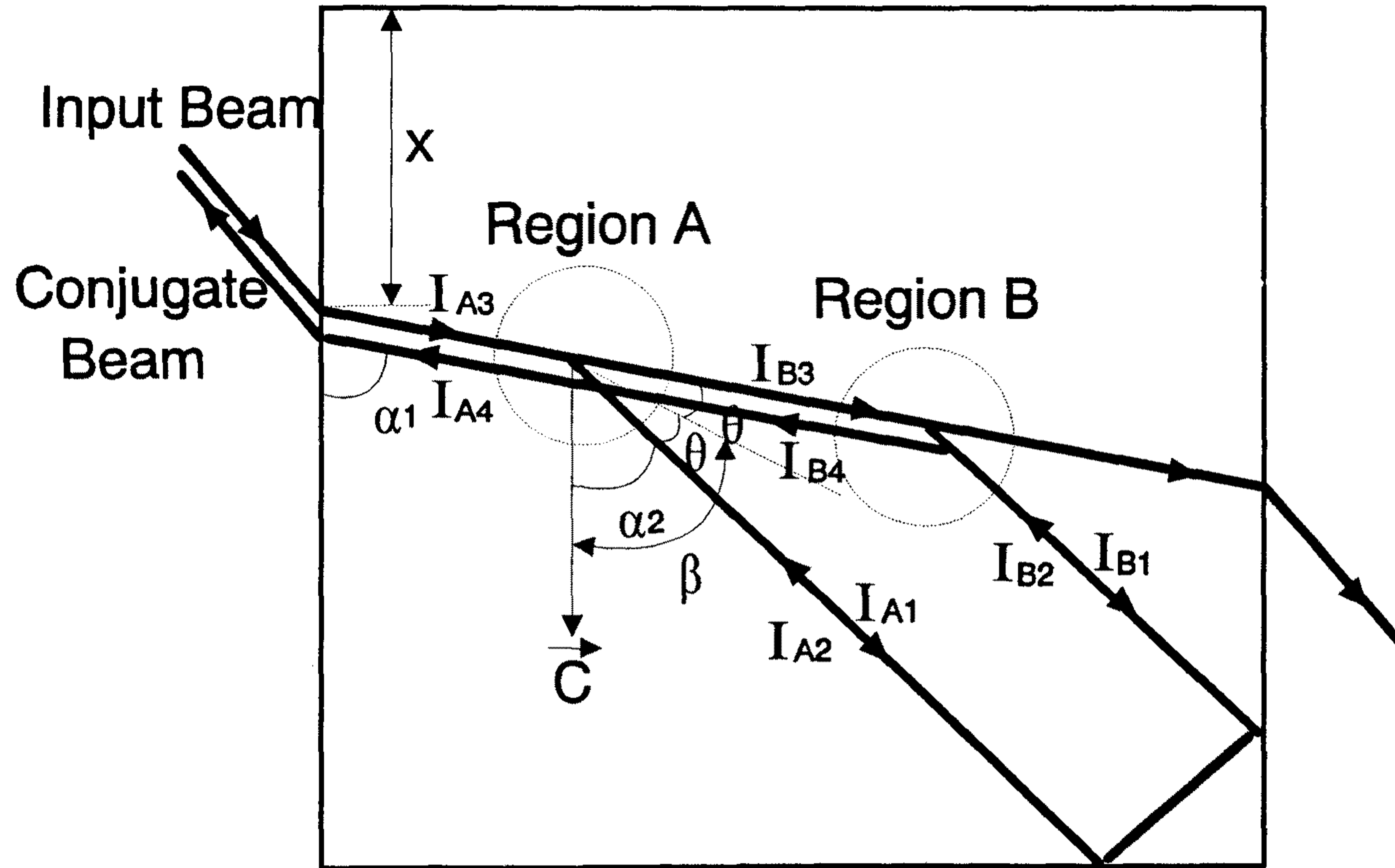


그림 5. 자기 펌핑 위상공액기 결정 내부의 빔 경로도

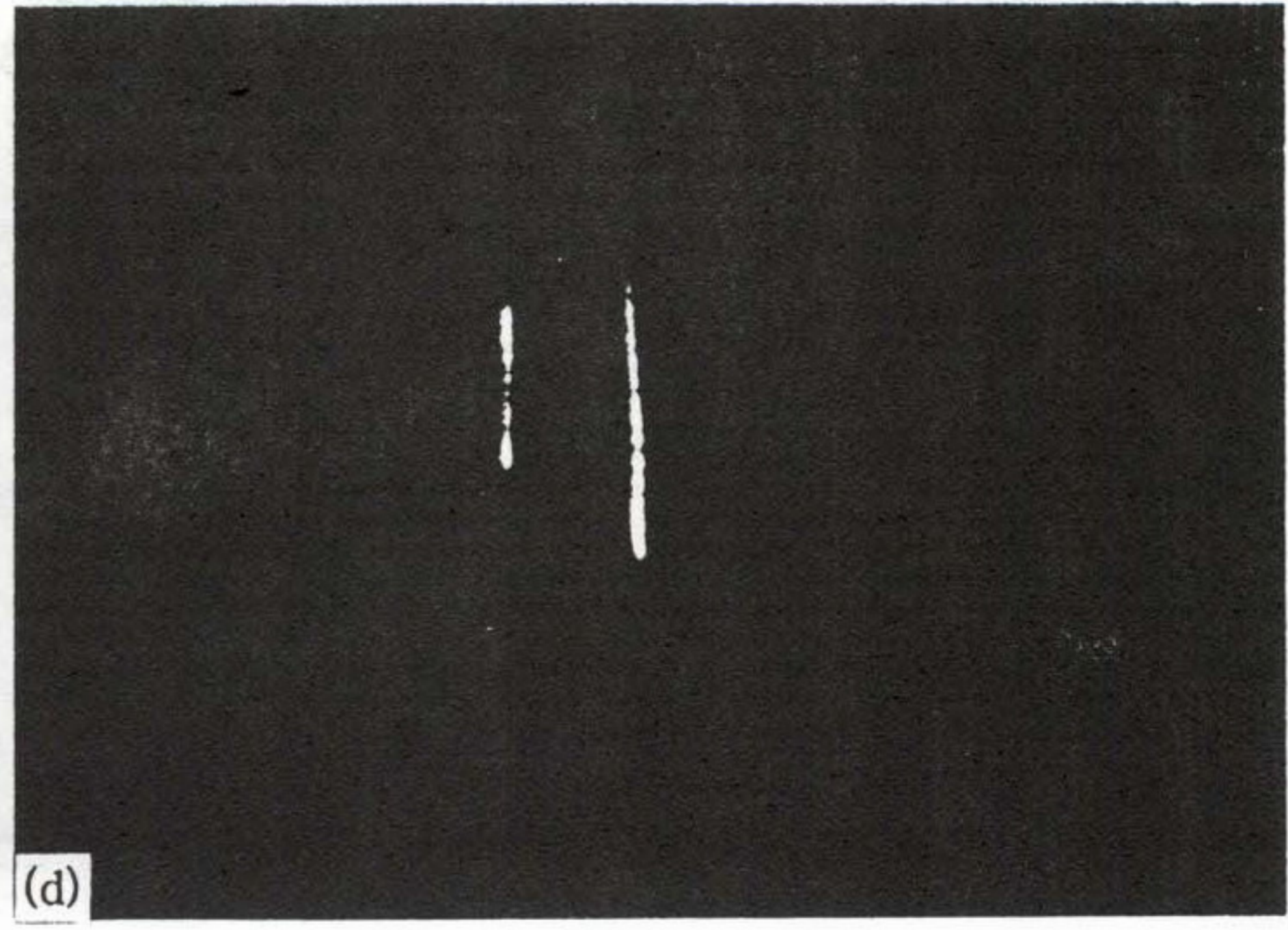
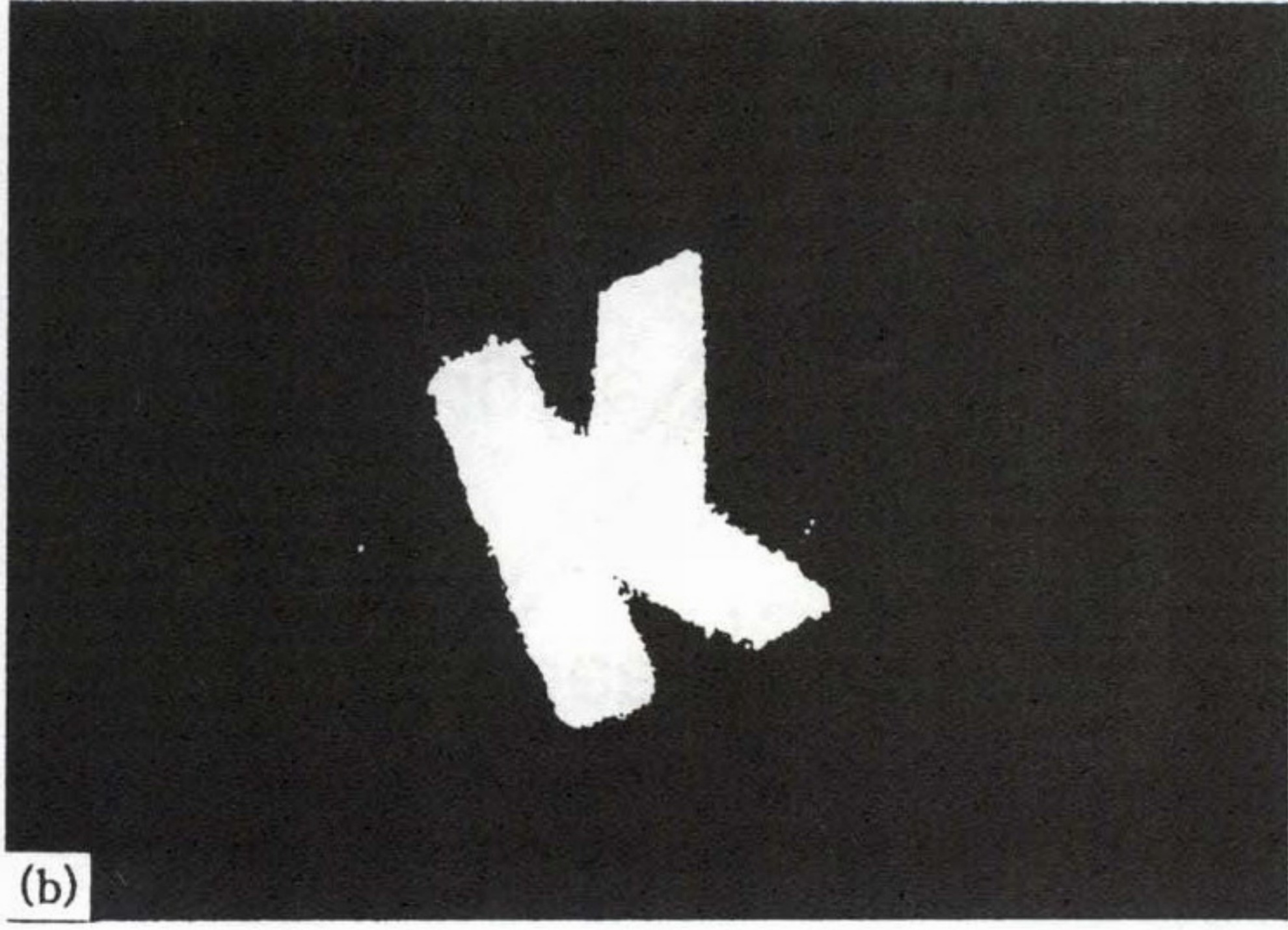
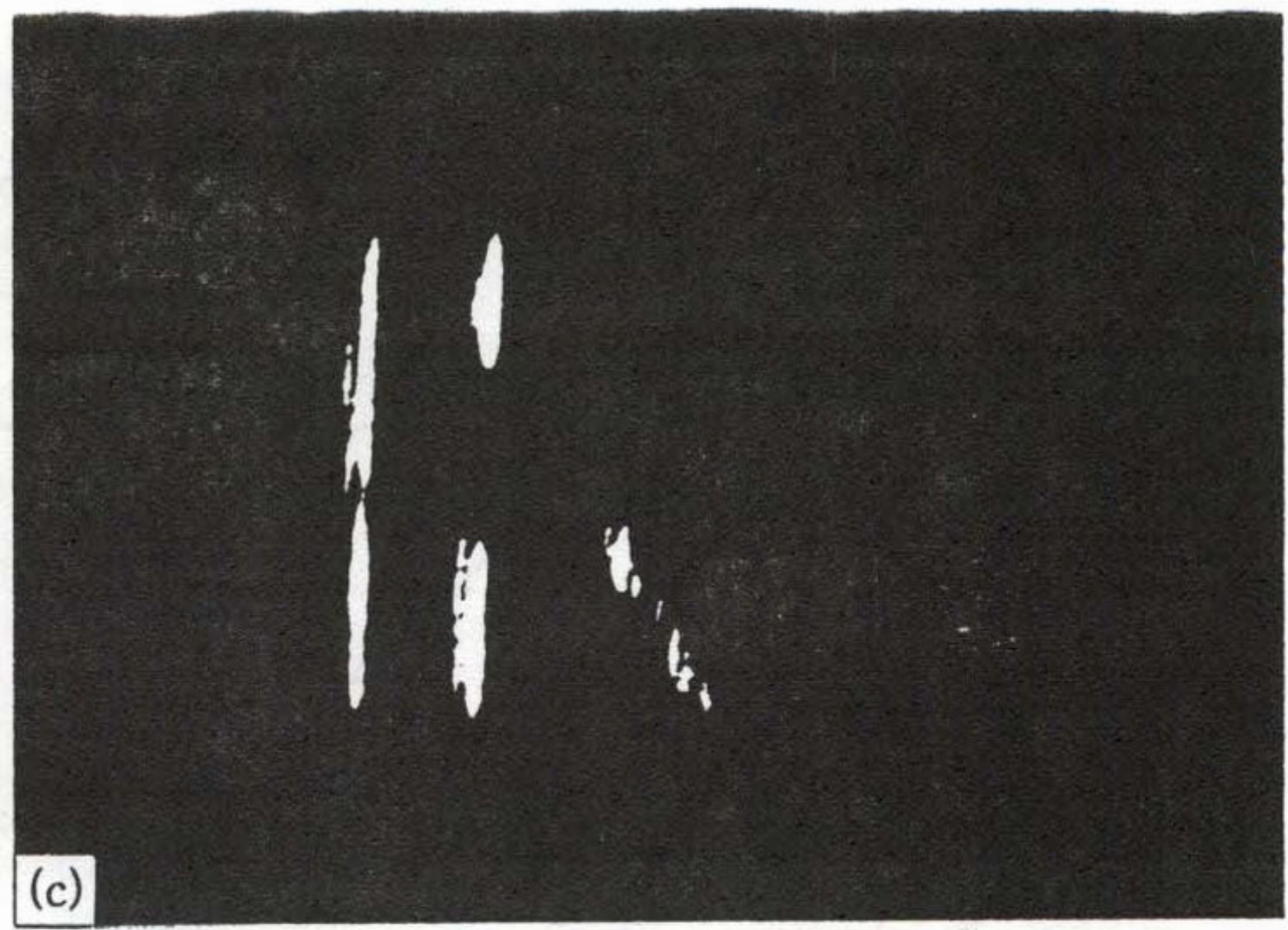
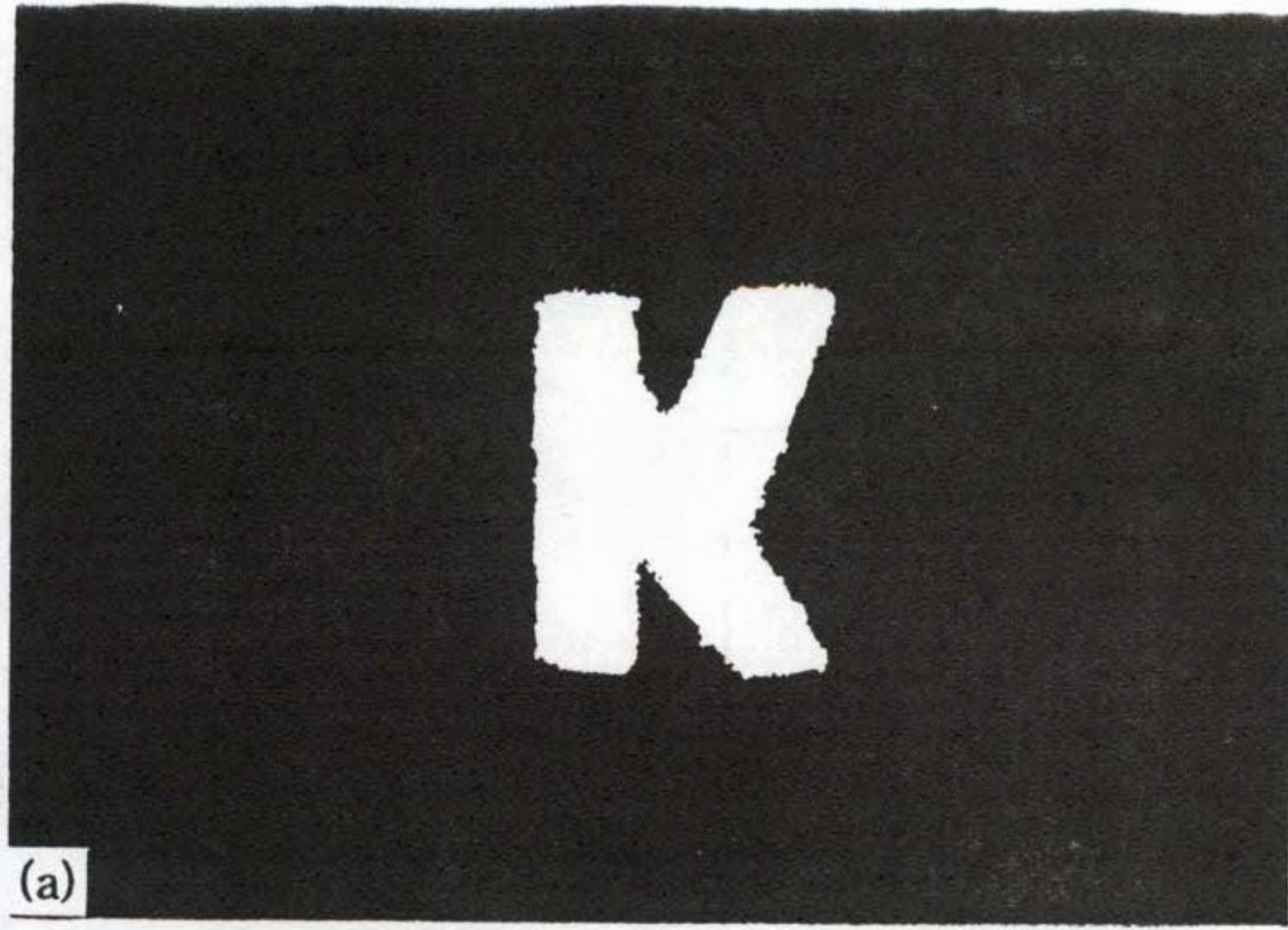


그림 6. 자기 펌핑에 의해 방향성 Edge Enhancement를 실험한 입력과 결과

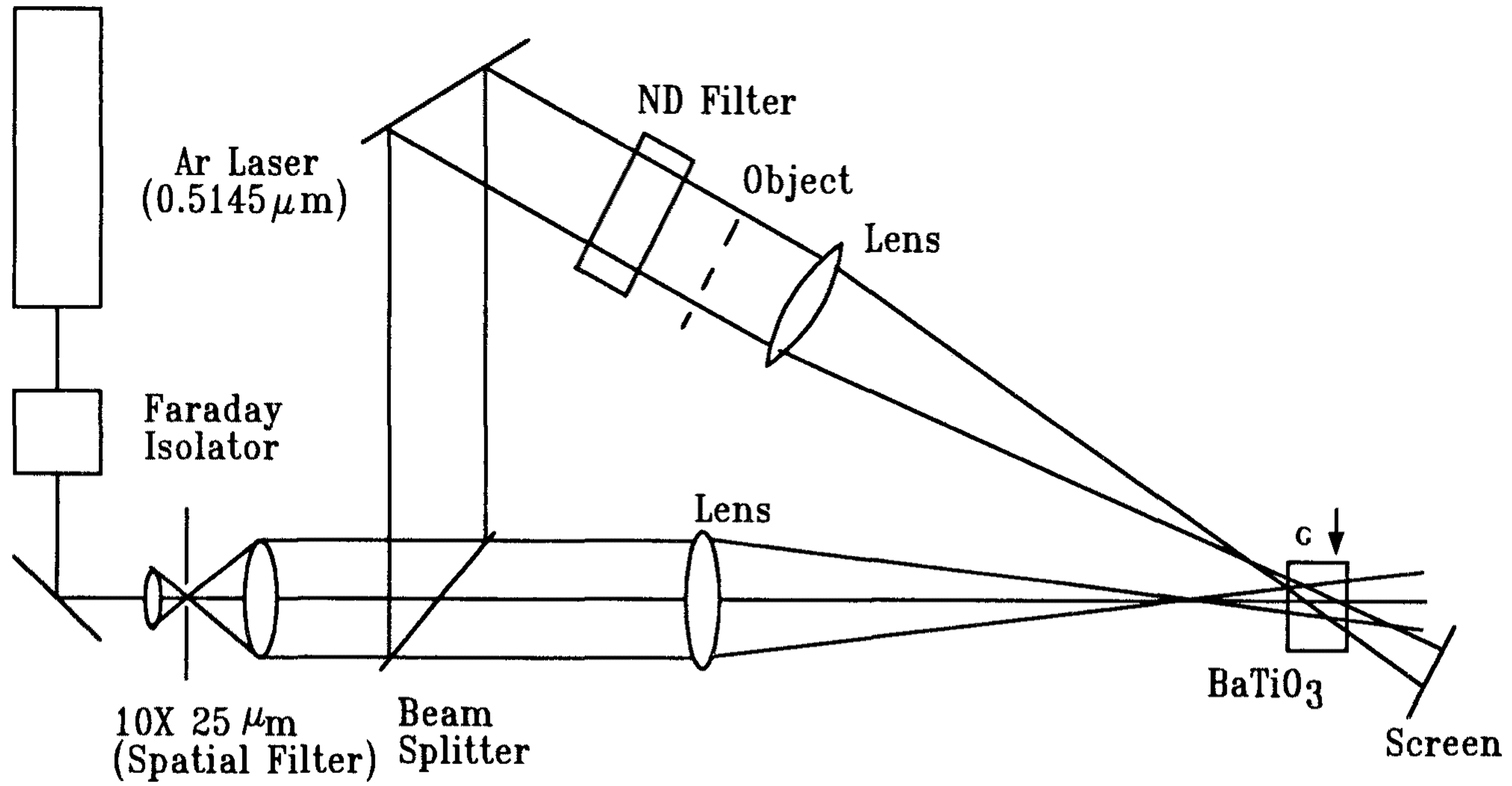
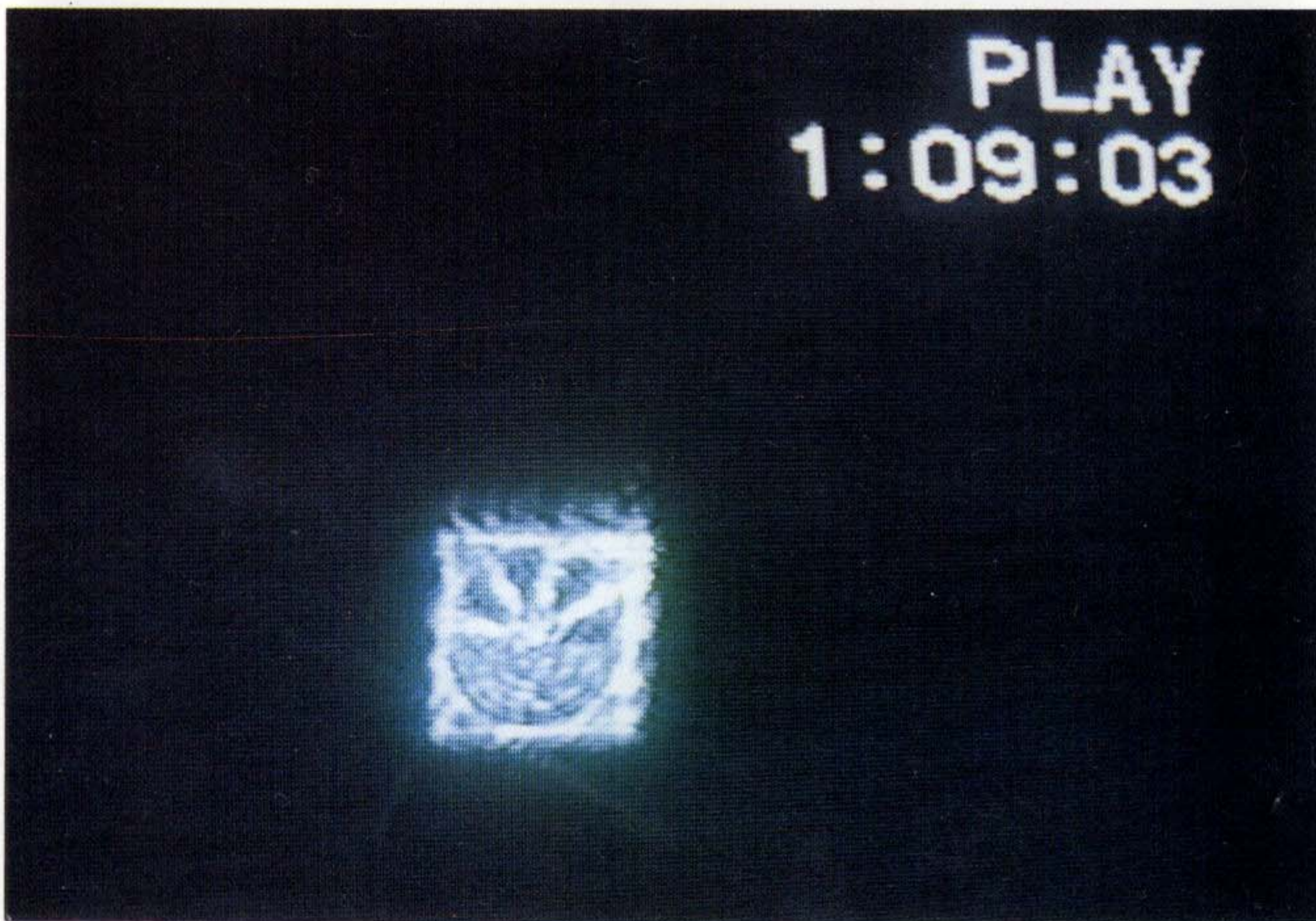


그림 7. 두 빔 결합에 의해 상의 광세기 증폭을 위한 실험의 구성도



(a)



(b)

그림 8. 두 빔 결합에 의해 상의 광세기 증폭을 위한 실험의 결과 예

합길이를 길게 하는 것이 좋은데 본 실험에서는 두 빔사이의 각을 20° 로 하였다. 이런 two wave mixing 을 이용하여 incoherent 에서 coherent image 전환⁽⁸⁾, positive 및 negative image transfer⁽⁹⁾, 동적 영역의 압축^(10, 11), 진동 모드의 가시화⁽⁷⁾ 및 novelty filter⁽¹²⁾ 등과 같은 영상처리에 응용하고 있는데 본 연구에서는 광 세기의 증폭을 나타내는 특성 이외에 새로이 여러 가지 광정보 처리에 유리한 특성을 발견하여 이를 많은 여러 시스템에 적용하여 이의 응용성을 연구하였다. 일반적으로 SPPC에 의해 얻어지는 OPC상은 fanning이 c-축으로 일어나기 때문에 결정내에서 c-축 방향의 반대방향의 일부가 깨끗하게 OPC상이 재현되지 않는 단점이 있으며 광의 밀도가 $1\text{W}/\text{cm}^3$ 정도가 되어야 하나 두빔의 결합에 의한 OPC상은 $1\text{W}/\text{cm}^3$ 보다 작은 광에서도 매우 깨끗한 상을 얻을 수 있었다. 또한 SPPC로 OPC를 얻으려고 하려면 다소의 반응시간을 기다려야 하는 단점이 있으나 이 두빔에 의한 OPC는 기준빔이 SPPC를 형성하고 있는 굴절을 격자에 입력을 입사하므로 실시간으로 반응한다. 그림 9는 두 빔을 이용한 OPC 발생의 결정 내부 구조도이다. 기준빔에 해당하는 입사각이 큰 빔은 SPPC가 안정되게 잘 일어나도록 입사빔의 위치, 각도 등을 조절하였으며 신호빔은 SPPC가 잘 일어나지 않게 광축을 거슬러 가는 방향으로 입사한다. 두 빔 결합에 의한 OPC의 발생은 안정된 기준빔에 의해 안정된 OPC가 발생하므로 신호빔과 기준빔은 상호간에 간섭이 일어나지 않게 하였다. 간섭이 일어날 경우 수신단에서 나타나는 SPPC 출력은 시간에 대해 진동하여 불안정하게 되는데 이는 기준빔에 의해 형성된

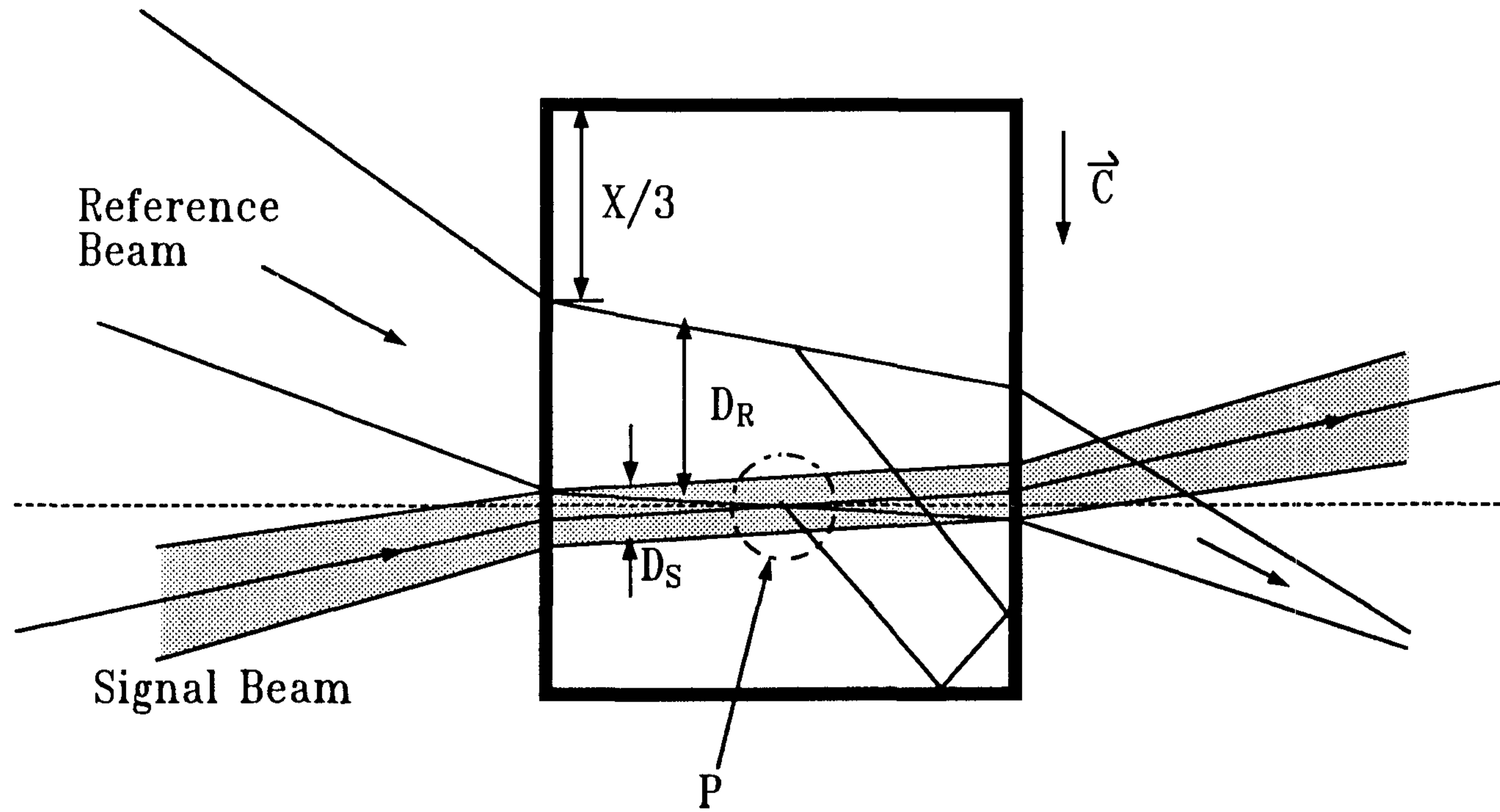


그림 9. 신호 빔과 기준 빔을 사용하는 두 빔 결합의 결정 내부도

SPPC 메카니즘이 안정된 조건을 찾기까지 변화되기 때문이다. 이 간섭을 피하면서 그림 9에서 보는 것처럼 기준빔이 형성한 fanning loop의 아래쪽 부분 P 지점을 신호빔의 중심이 지나도록 하여 SPPC 영상이 시간에 대해 안정하고 좋은 화질이 되도록 하였다. 신호빔의 중심이 P의 상하로 이동하게 될 때 결정 내부에서 반사율이 감소하게 되어 SPPC 영상의 밝기가 떨어지며 기준빔과의 간섭이 증가하게 되어 SPPC 영상이 시간에 따라 진동하는 것을 관찰할 수 있었다. 두 빔의 결합에 의한 OPC 발생의 특성을 연구하기 위해서 그림 10과 같은 실험 구성을 하였다. 이 실험의 결과인 그림 11은 OPC상을 만들기 위해 입력으로 약 10^{-3}W/cm^2 보다 작은 광을 입사시켜서 얻은 결과이다. 그림에서 흐리게 나타난 상들은 빔분할기 및 렌즈 등을 통해 직접 반사된 상이다. 따라서 두빔의 결합에 의한 OPC의 형성은 SPPC에 의한 OPC보다 매우 작은 광의 세기로도 양질의 OPC를 실시간으로 얻을 수 있으므로 매우 유용성이 높을 것으로 여겨진다. 실시간 OPC의 발생 이외에 신호빔의 위치가 기준빔의 중앙에 위치함에 따라 그림 12(b)와 같이 전방향에 모두 edge enhancement가 일어났다. 신호빔의 위치를 기준빔의 중심 부위에서 이탈하였을 때 그림 10(c)와 같은 수직 성분이 약해진 결과를 얻었다. 이 현상을 앞에서 언급한 SPPC의 방향성 edge enhancement와 관련시켜 볼 때 SPPC의 edge enhancement는 입력빔의 waist가 매우 가는 관계로 중심의 굴절을 격자와 일치시키지 못한 결과가 아닌가 사려된다. 일반적으로 edge enhancement는 four wave mixing에 의해 기준빔과 신호빔의 세기를

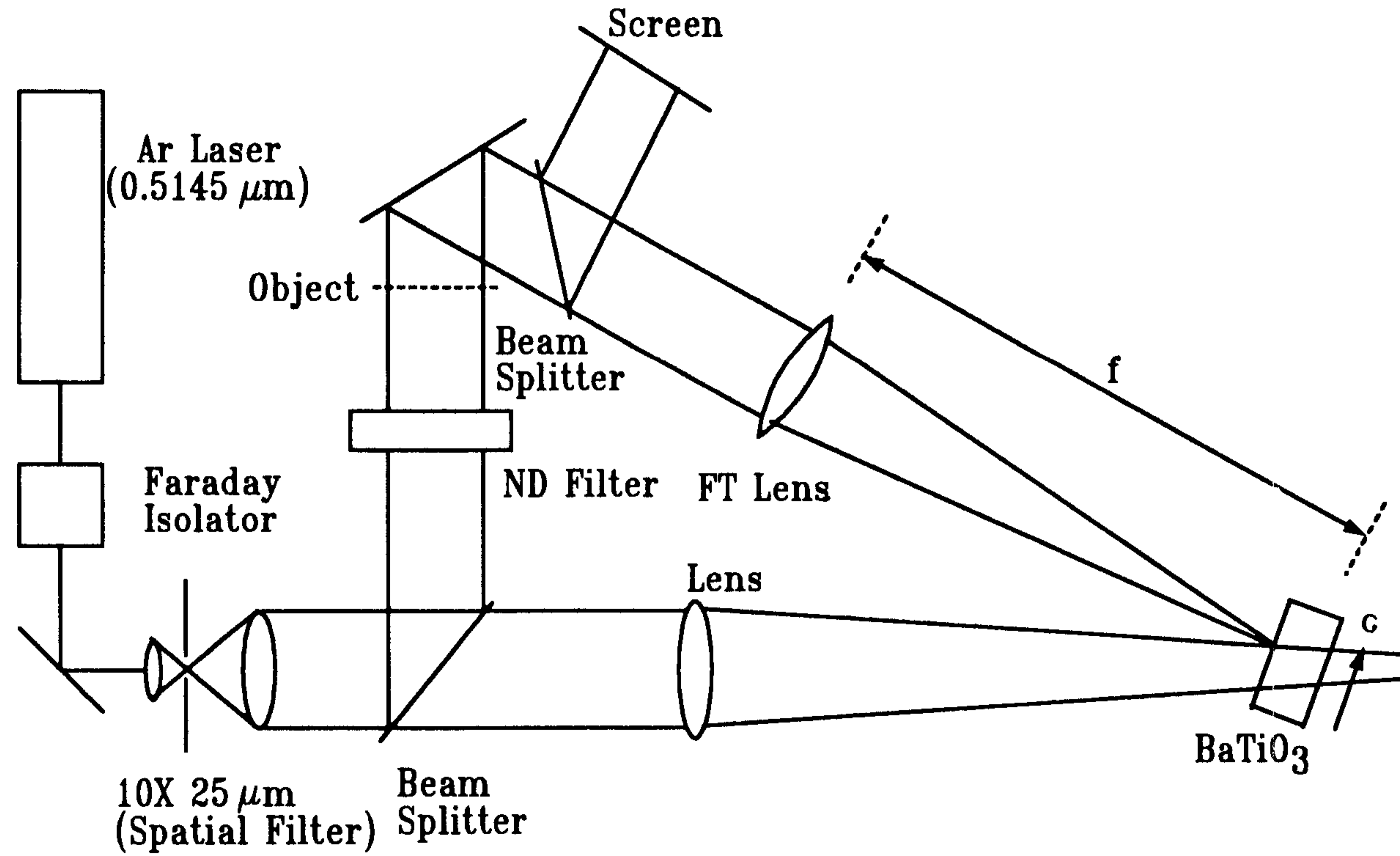
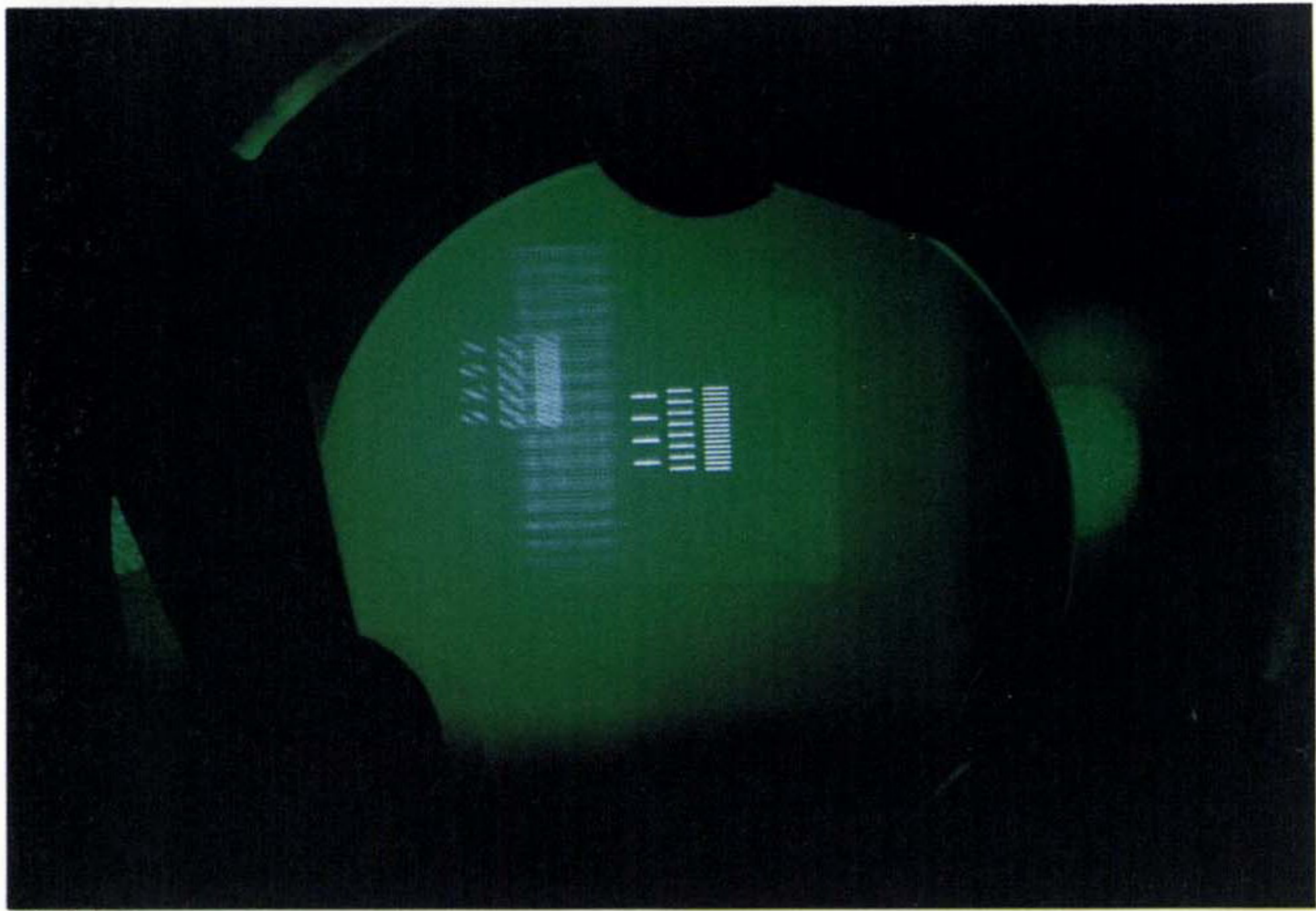
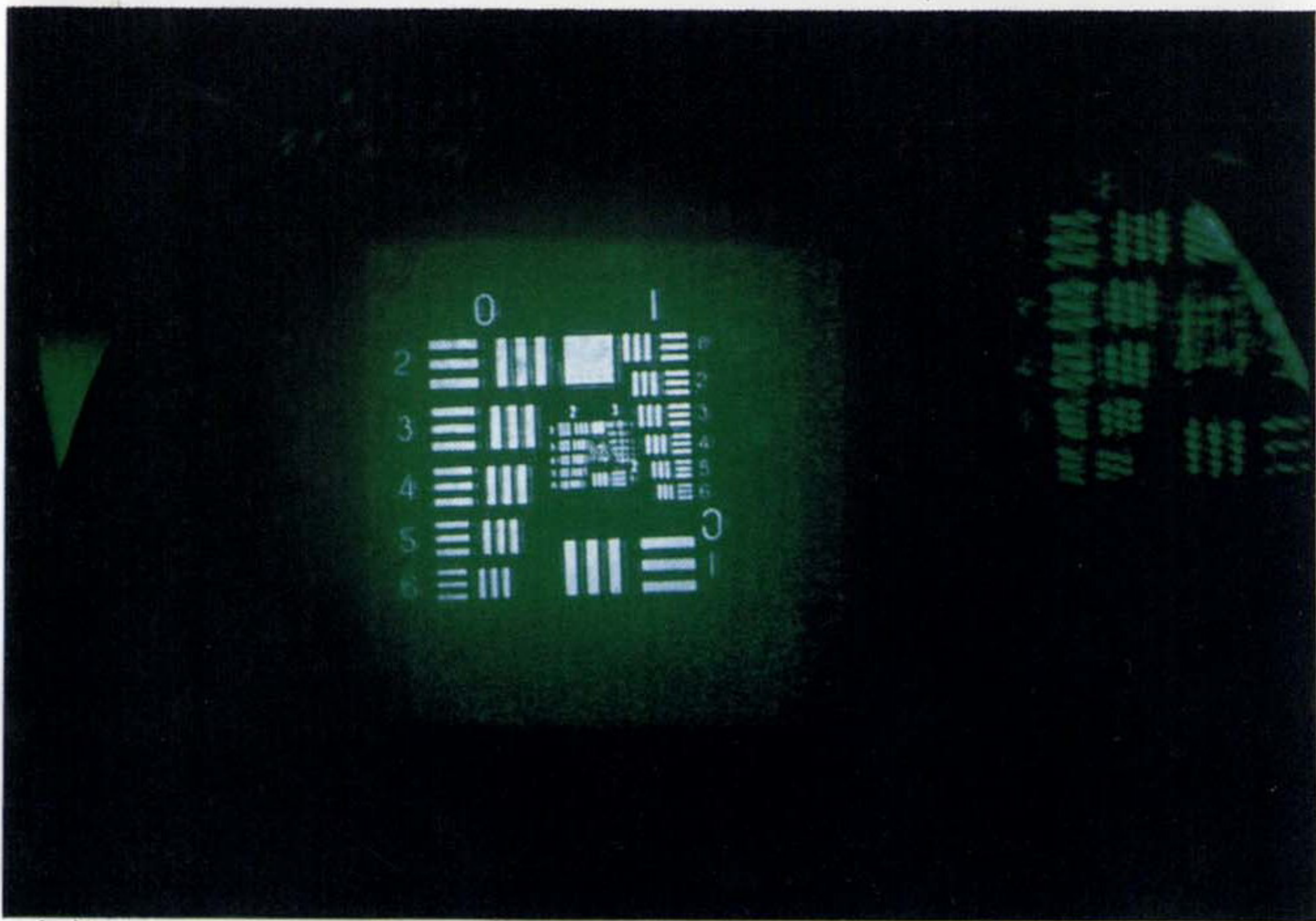


그림 10. 두 빔 결합에 의해 OPC상을 얻기 위한 실험의 구성도



(a)



(b)

그림 11. 두 빔 결합에 의해 생긴 OPC상

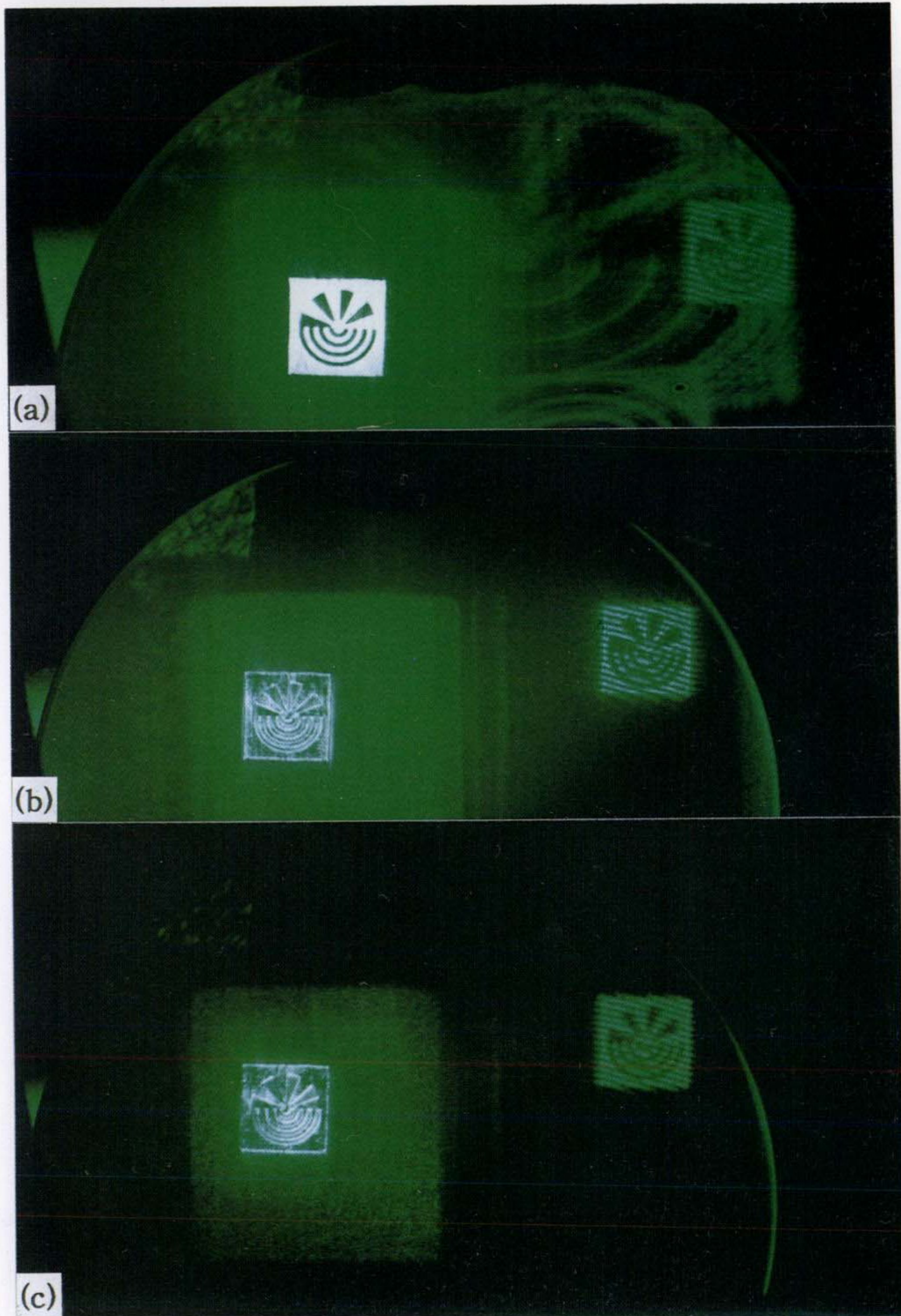


그림 12. 두 빔 결합에 의해 생긴 OPC상
 (a) OPC상, (b) Edge Enhancement 상, (c) 수직성분의 Edge Enhancement 상

조절하므로서 얻을 수 있는 것⁽¹³⁾에 비해 본 실험에서 얻은 전방향성 edge enhancement는 four wave mixing의 align 문제 및 빔의 세기 조절에 크게 영향을 받지 않고 있는 장점을 갖고 있어 이의 유용성이 매우 클것으로 사려된다. 그림 13은 gray 레벨을 갖는 상을 입력시켜서 얻은 OPC 상으로 SPPC에 비하여 좀더 뚜렷한 gray 레벨의 보존을 나타내고 있다. 그림 14는 각각 SPPC와 두 빔의 결합에 의한 OPC로 얻은 5 등분된 gray 레벨의 분포도 이다. 그림 14(a)와 같이 OPC의 발생 잡음에 의해 SPPC의 경우에는 gray 레벨의 경계가 불분명해졌으나 그림 14(b)에서 보는 것과 같이 두 빔의 결합에 의한 gray레벨의 보존은 거의 유지하고 있음을 알 수 있다.

제 2 절 두 빔을 이용한 OPC의 응용

두 빔 결합에 의한 OPC가 광정보 처리에 매우 유용함을 알고 본 연구과제에서는 위상공액기를 이용하여 간섭계를 구성하였다. 위상공액기를 이용하는 간섭계는 여러 방법이 연구되어 왔으나 주로 Mach-Zehnder간섭계나 Michelson 간섭계를 구성하여 입사파와 위상공액파의 사이에 간섭을 형성하여 광컴퓨팅이나 coherent 영상연산 등에 적용시키고 있다⁽¹⁴⁾. 그림 15는 Michelson 간섭계형의 위상공액 간섭계로 빔 분할기에 의해 갈라진 두 빔이 time reversibility의 Stokes 원리에 의해 빔 분할기에서 다시 재결합되었때 빔 분할기에 의한 투과도와 반사도를 t , r 과 t' , r' 이고 t^* , r^* 는 위상공액파에 의한 투과도와

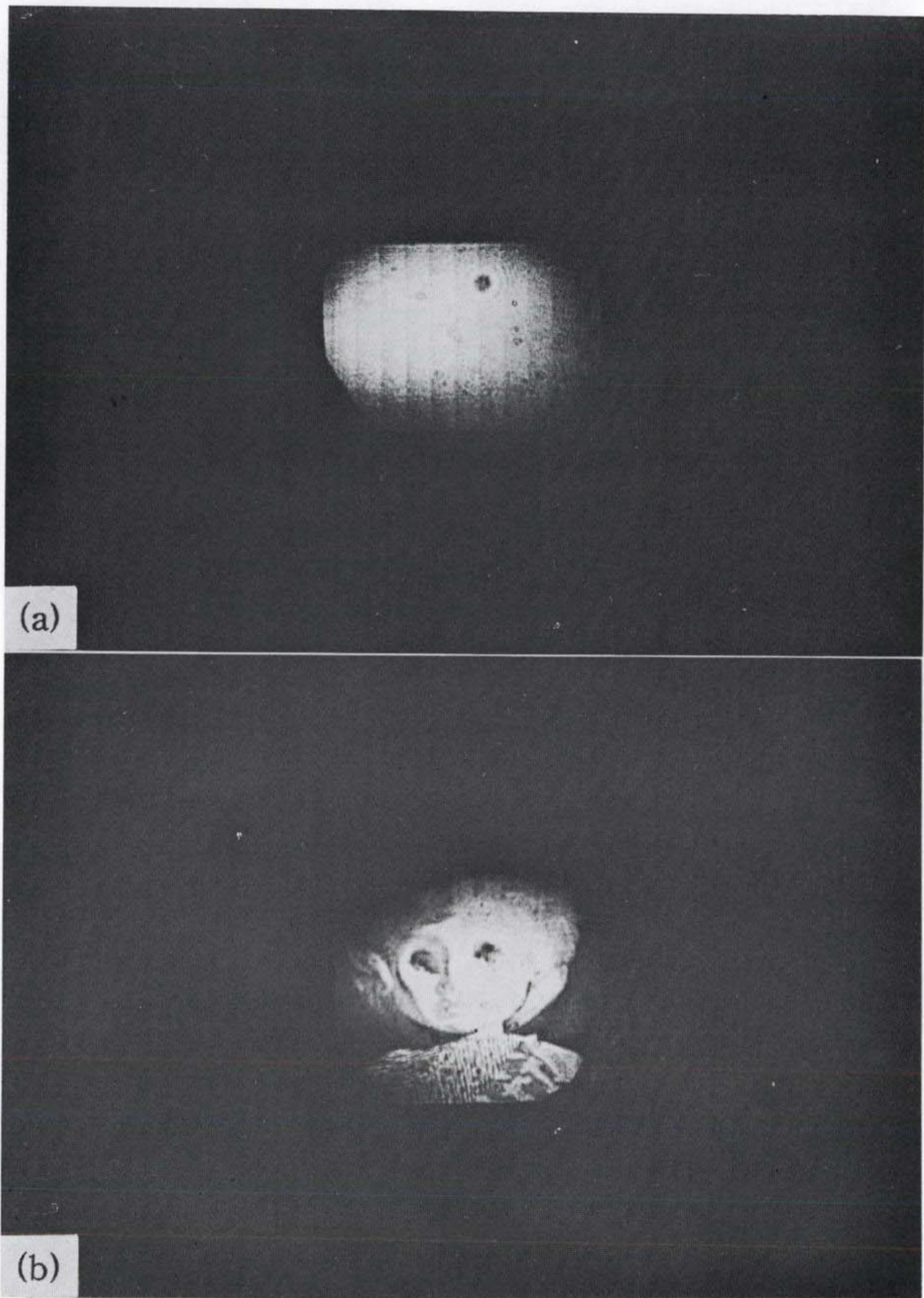
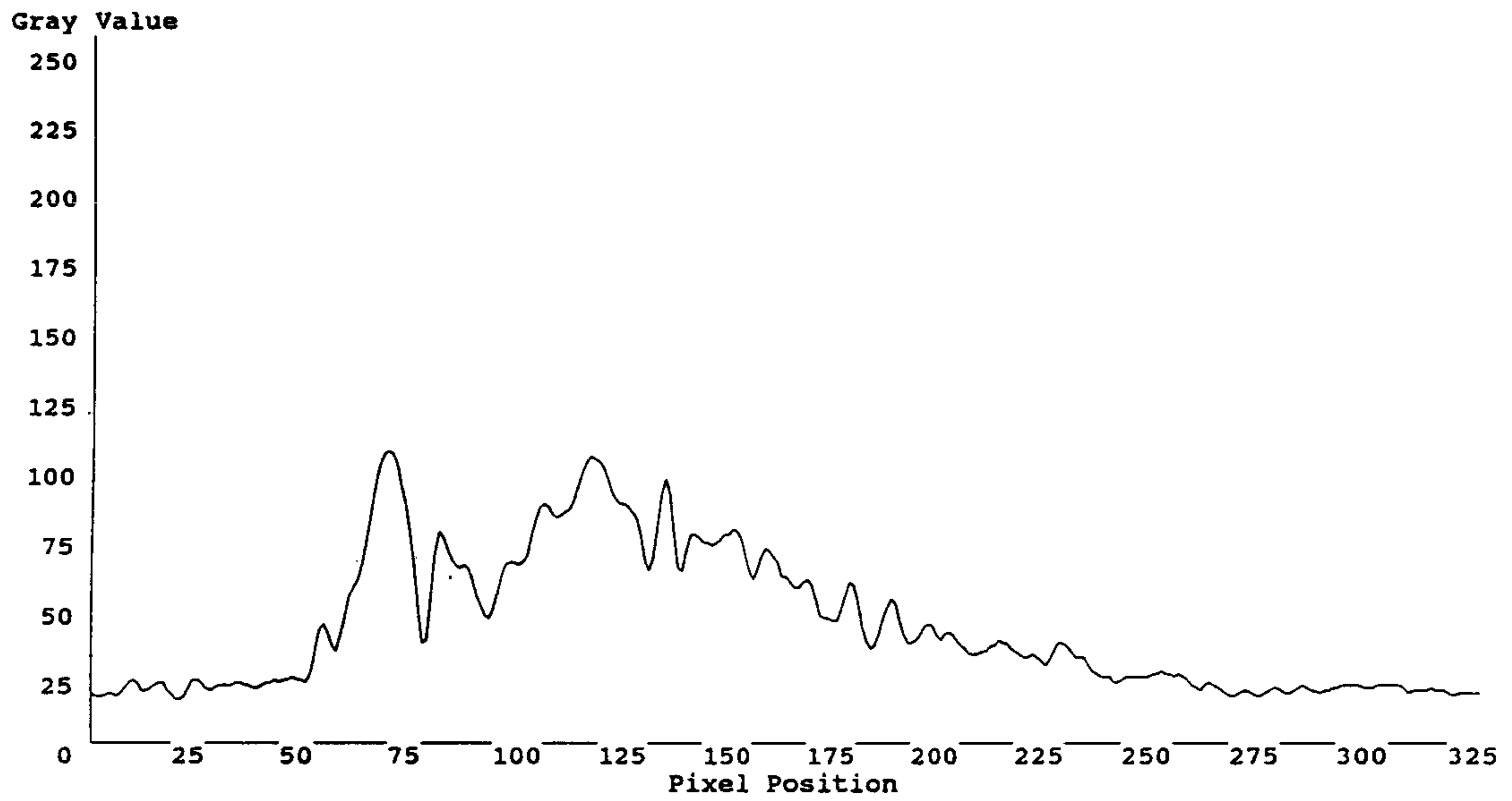
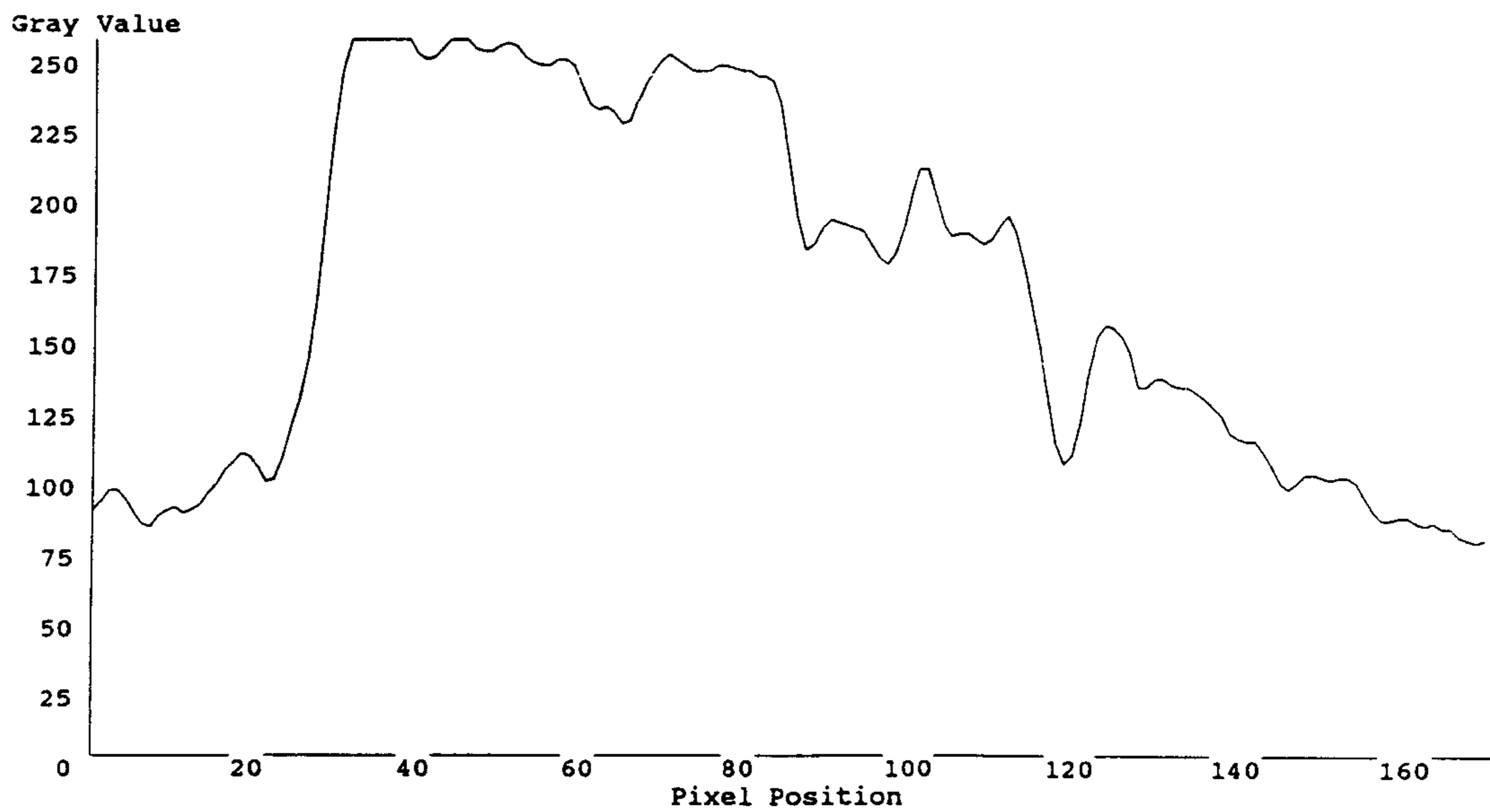


그림 13. Gray 레벨을 시험하기 위한 두 빔 결합에 의해 생긴 OPC상



(a)



(b)

그림 14. Gray 레벨을 시험하기 위한 OPC상의 Gray 레벨
 (a) SPPC에 의한 Gray 레벨
 (b) 두 빔 결합에 의한 OPC의 Gray 레벨

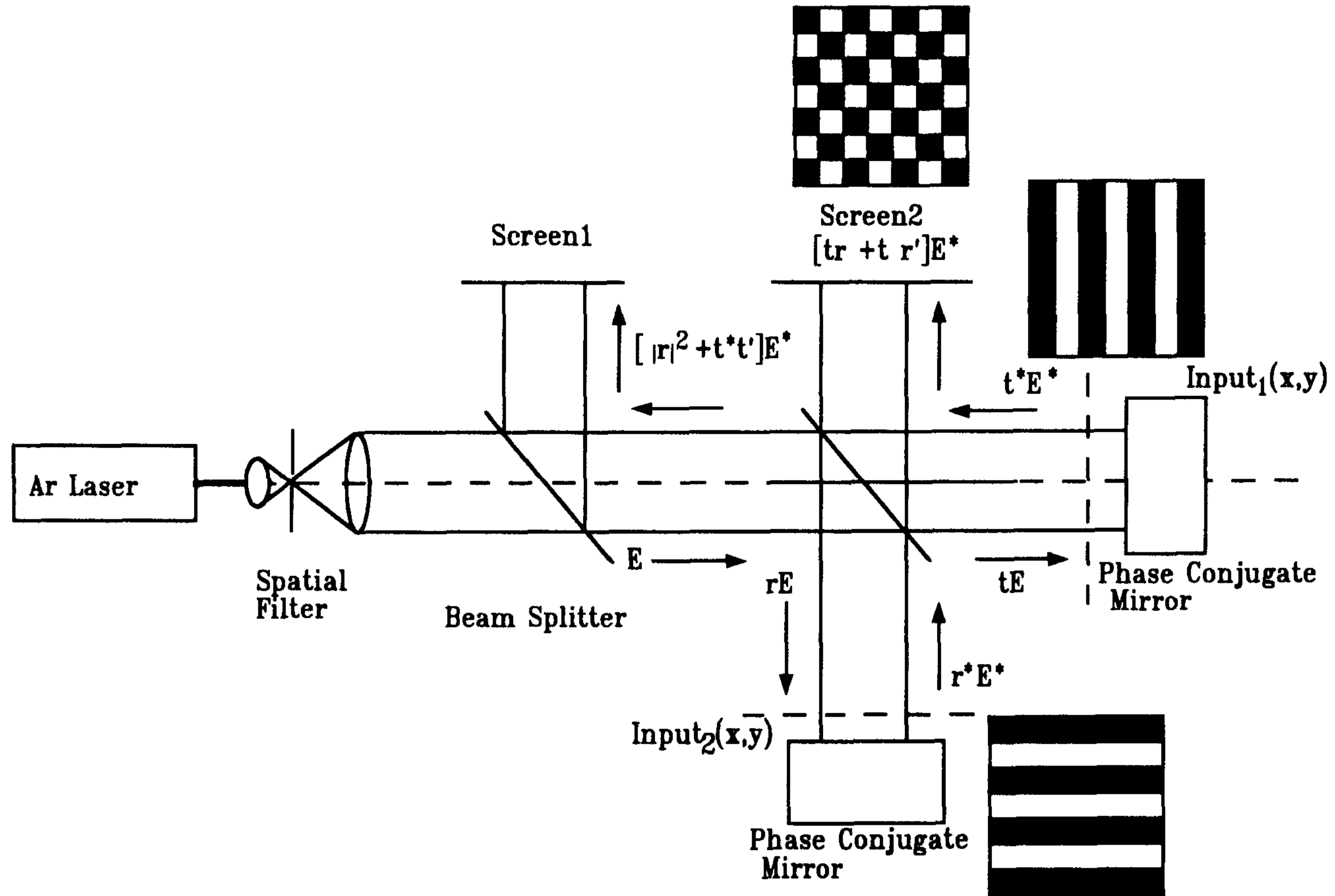


그림 15. Michelson 간섭계 형의 광 위상공액 간섭계

반사도라면 screen1에 나타나는 image세기는 간단히

$$I_B(x,y) = E^2 C^2 [TT_1(x,y) + RT_2(x,y)]^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

로 주어진다. 따라서 그림 15에서 보는 바와 같이 각 위상공액기 앞에 입력 영상을 넣었을때 screen2에서 얻은 결과는 두 영상의 차이를 볼 수 있으며 screen1에서는 영상의 합을 볼 수 있다. 실제로는 이론적으로 예상한 것과는 달리 위상공액기가 이상적인 위상공액파를 발생하지 않고 빔분할기가 이상적으로 passive linear 매체로 역할을 하지 못하므로 다소 상의 잡음이 있을 것으로 예상되었다. 그림 16는 두 개의 거울 대신에 한개의 광굴절성 결정을 사용하여 Michelson 광위상공액 간섭계를 구성한 것이다. 각각의 object를 통과한 빔에 대해 SPPC로 OPC를 발생시켜 안정화를 확인한 후에 두 OPC빔을 결합시켰다. 그림 17과 같은 결과를 얻었다. 그림 17(a)와 같이 두 도형의 차를 얻을 수 있었으며 한편으로 screen1에서 그림 17(b)와 같은 두 도형의 합을 얻을 수 있었다. 이 실험은 각각의 image를 한개의 결정을 사용하여 입사면을 같게 입사시켜 두 OPC가 cross-talk하였음을 보여주고 있다. 같은 평면상에 있게 형성하지 않거나 두 개의 다른 결정을 사용할 경우 image의 가감산은 특이하게 screen1과 screen2사이에서 가감산이 불안정하게 진동하는 현상을 보였다. 그림 16과 같이 object2를 통과한 빔은 결정에 수직으로 입사되고 object1를 통과한 빔은 c-축방향으로 입사되는 경우에만 image의 가감산 간섭계가 안정화 되었다. 이 위상공액 간섭계는 위에서 언급된 image의 가감산의 개념을 도입하여 그림 18과 같이 입력상의 intensity inversion도 가능하며 단순히 image

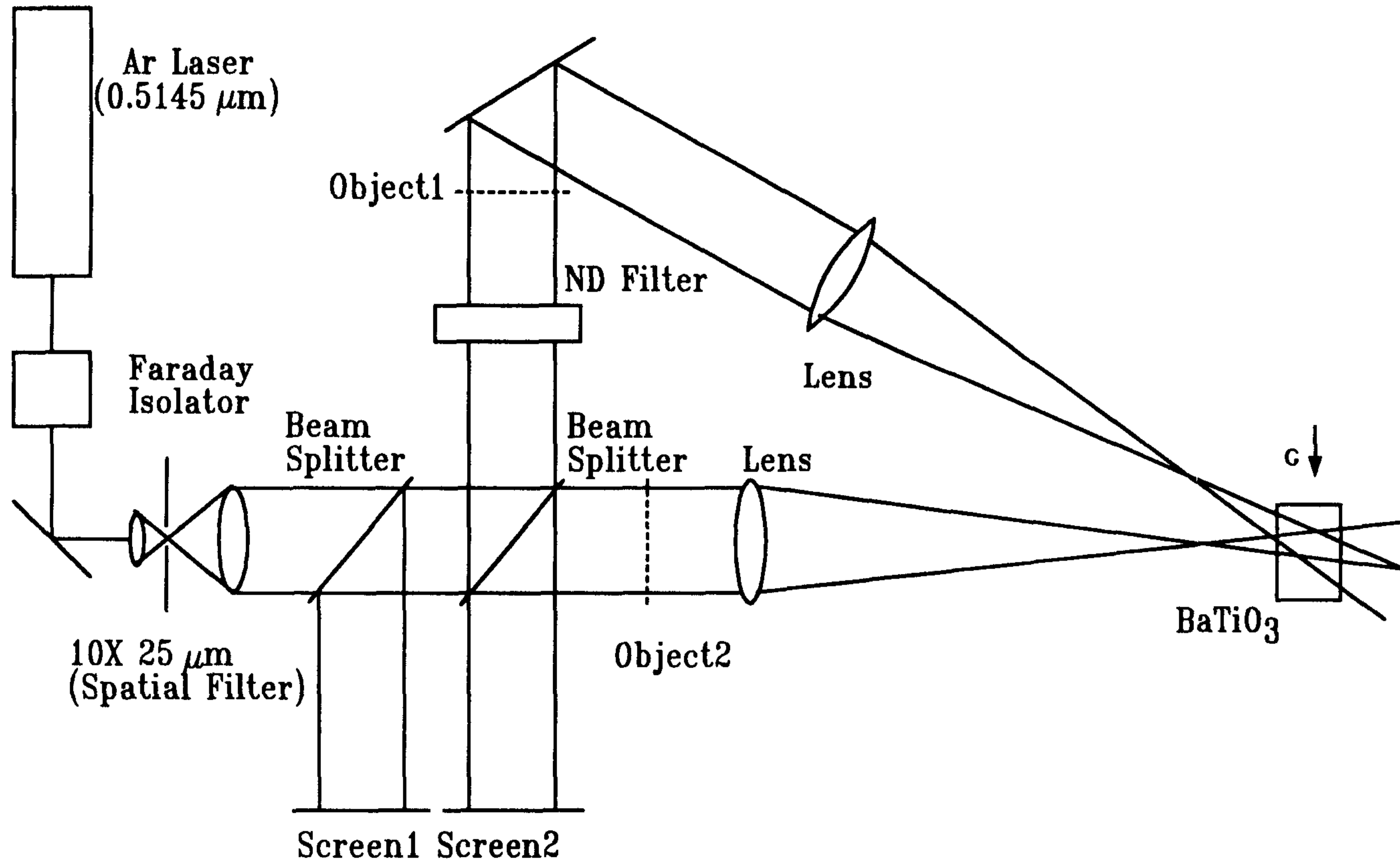
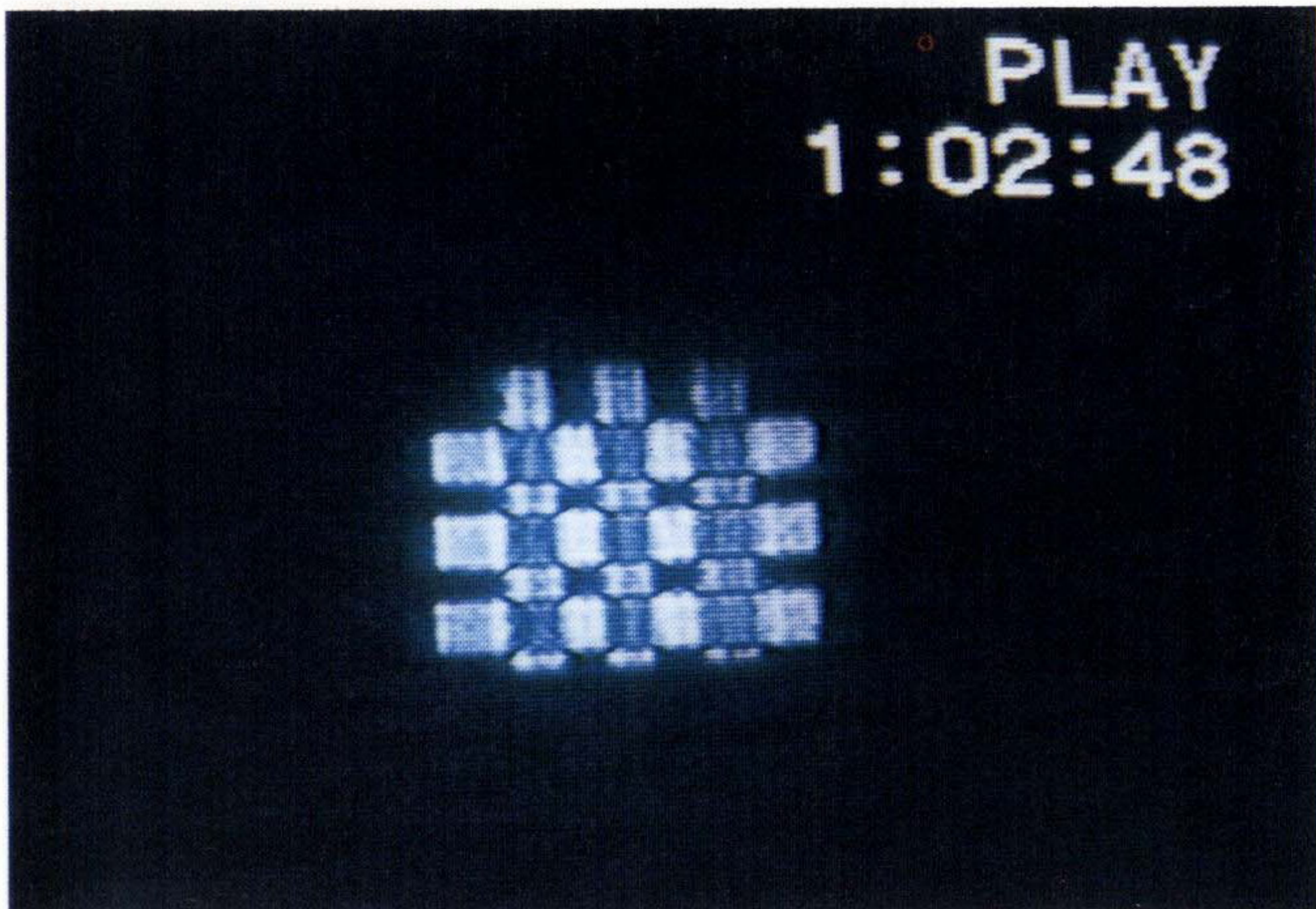
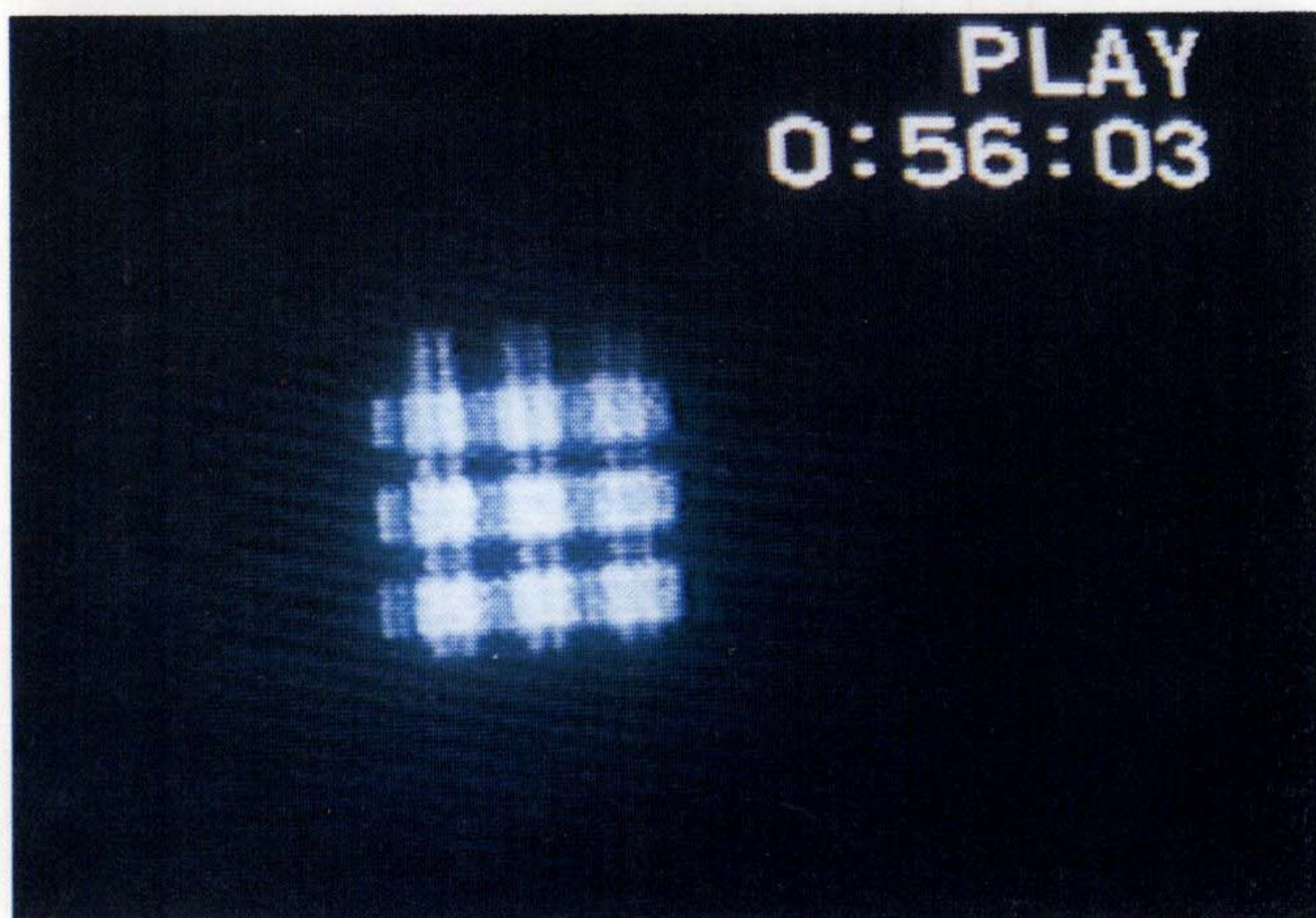


그림 16. 광굴절성 결정을 사용한 광 위상공액 간접계 실험을 위한 구성도



(a)

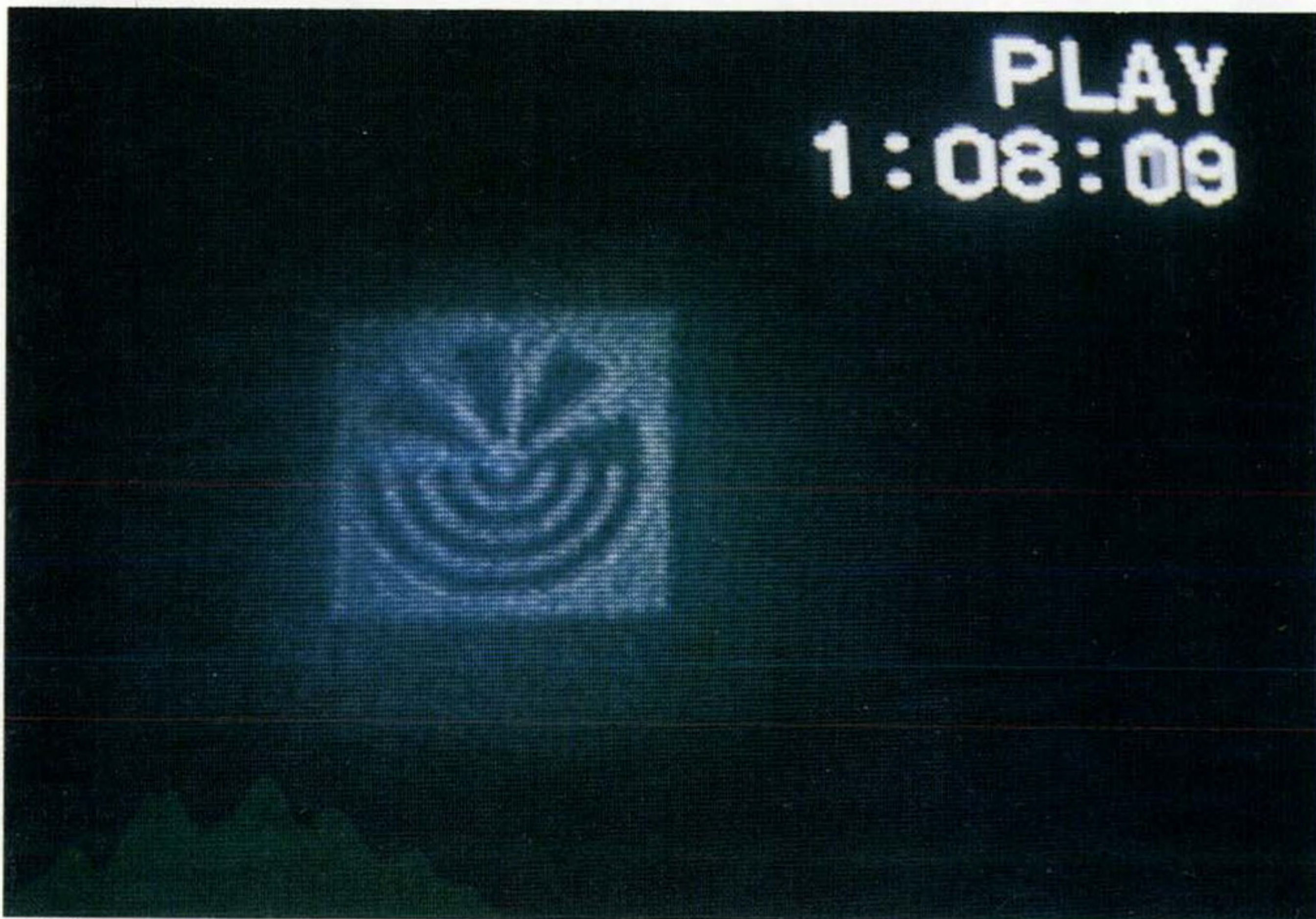


(b)

그림 17. 광 위상공액 간섭계에 의해 상의 가감산



(a)



(b)

그림 18. 광 위상공역 간섭계에 의해 상의 광세기 Inversion

의 amplitude를 감할 수도 있고 시공간적으로 미분화도 가능하다⁽¹⁴⁾.

제 1차년도 연구에서 위상공액파의 광파이버 응용을 연구하였었다. 위상공액파의 광파이버 응용은 광파이버 자이로 스코프의 응용과 광정보 전송에 주로 연구되어 왔었다. 광대역 통신에서 필요한 광기술 산업의 발전과 더불어 광파이버의 활용은 최근 들어 더욱 확대되고 있다. 광파이버의 사용은 주로 광통신에 제한되어 있으며 기존의 광통신 방법에 의한 정보 전달은 1차원 또는 2차원 정보를 디지털화하여 얻어진 디지털 신호에 대응하는 광펄스열(light pulse train)을 광코딩(optical encoding) 방법에 의해 구성하여 광파이버에 입력시켜 전송한다. 수신단에서는 전송된 광펄스를 광다이오드와 전자장치에 의해 원하는 형태의 신호로 변환시키는 과정을 통해 정보전달이 이루어진다. 광에 의한 광파이버 직접 정보전송은 전송시스템의 입력단에서 전자신호를 광신호로 변환하고 수신단에서 받은 광신호를 전자신호로 바꾸는 과정을 생략할 수 있어 전송에 걸리는 시간의 단축과 전송 시스템의 구조를 간단히 할 수 있다. 광파이버에 의한 광정보의 직접 전송은 광파이버의 특성에 의해 직접 전송시 광정보의 편광성과 공간성이 상실되어 광정보가 변형되므로 주로 그 방법상에서 spectral coding 법이나 위상공액파를 이용한 보상을 여러 연구기관에서 연구하고 있지만 초보적인 단계이며 아직 실용화 가능성이 있는 전송 방법은 개발되어 있지 않다⁽¹⁵⁻²⁷⁾. 송신단과 수신단이 같은 쪽에 있는 더블패스 화상 전송(double-pass image transmission: DPIT) 시스템을 구성하여 광파이버에 의한 전송의 가능성과 전송에 따른 광파이버의 특성, 그리고 사

용되는 광굴절성 결정의 전파특성에 대한 기초 연구를 수행했다. 1차년도에서 얻어진 자기편평 위상공액(SPPC)⁽²⁸⁻³⁰⁾ 출력은 시간에 대해 불안정하고 출력단에서 SPPC 상을 얻기 위해서 많은 시간이 걸렸다. 앞에서도 언급하였지만 이 시간은 광굴절성 결정 내부에서 입사되는 영상빔(object beam) 또는 신호빔(signal beam) 자체에 의해 결정 내부에서의 빔의 산란, 빔 fanning의 과정을 거쳐 광굴절격자를 형성하기 위한 시간으로 입사조건에 따라 수 분 (a few minutes)의 긴 시간이 요구되었다. 당해년도 본 연구에서는 DPIT 시스템을 이용하여 다중모드 광파이버와 광위상공액기를 기본으로 하는 전송 방법과 특성, 그리고 전송되는 영상의 해상도(resolution)와 화질(image quality)을 높이고 전송하는 시간을 줄이는 실시간 광정보 전송을 위한 연구를 수행하였다. 그림 19는 제 1차년도에서도 연구하였던 실험의 개략도이며 상단의 상은 "K"자의 입력상에 대해 전송된 상을 나타낸다. 당해년도에서는 앞에서도 언급하였던 두 빔의 결합에 의한 OPC를 이용하여 그림 20과 같은 실시간 광정보 전송시스템을 구성하였다. 연구 결과 DPIT 시스템하에서 주어진 입력영상이 광파이버를 통해 전송되고 광위상공액기를 통해 출력단에서 얻어질 때 재생된 영상이 시간에 대해 안정되고 거의 실시간 내에 얻을 수 있었다.

당해년도에 두 빔 결합에 의한 OPC의 특성을 연구하던 중에 광굴절성 결정 OPC의 기억 유지의 특성을 발견하고 그림 21과 같은 광학 시스템을 구성하였다. SPPC를 연구하였을 때에는 결정내 격자의 유지가 어느 정도로 유지하는지 여부가 판정되기가 어려웠으나 그림 21과

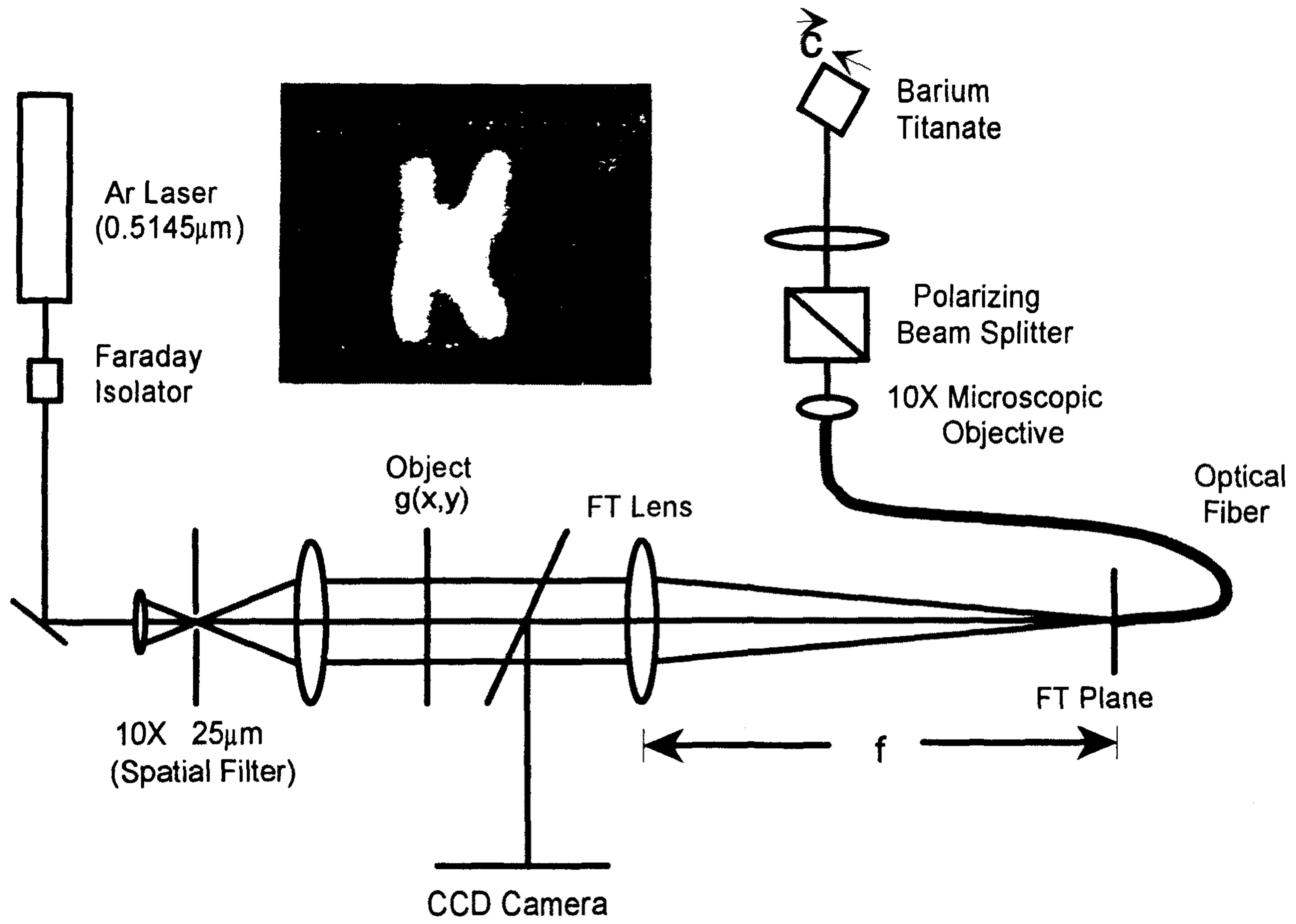


그림 19. 광 위상공액기를 이용한 더블 패스 광정보 전송 시스템

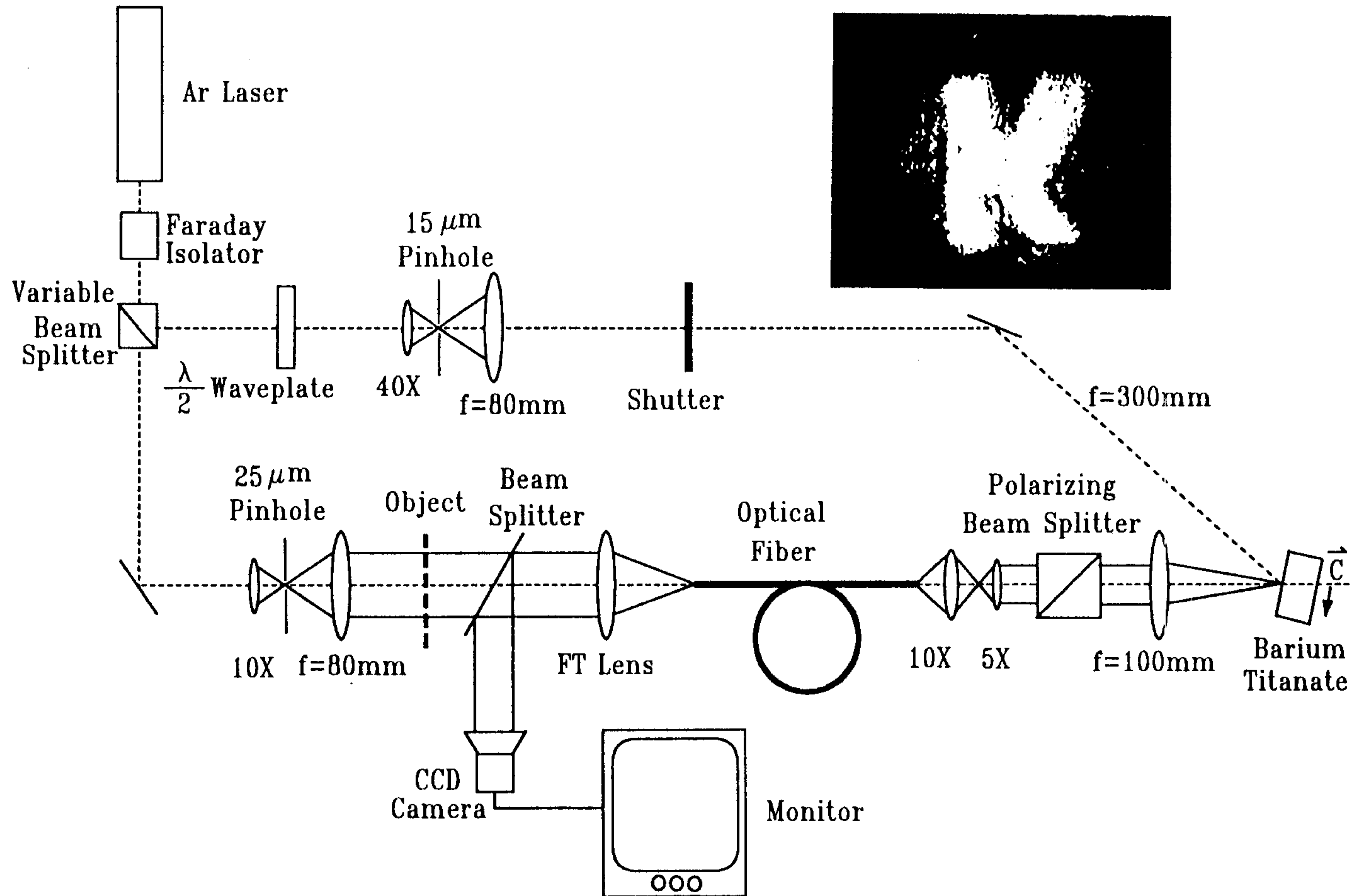


그림 20. 두 빔 결합을 이용한 더블 패스 광정보 전송 시스템

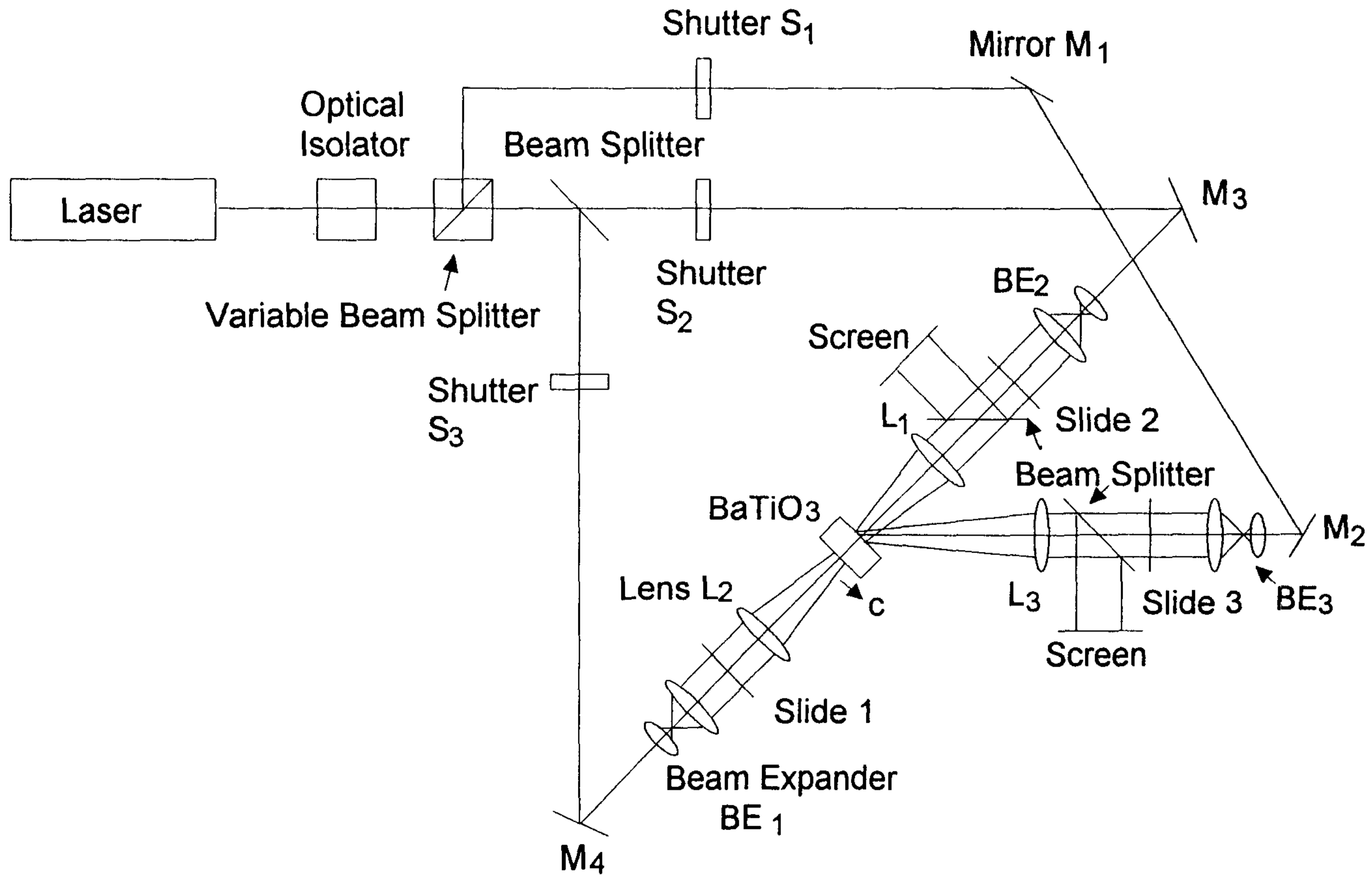


그림 21. 네 빔 결합에 OPC 상을 얻기 위한 시스템

같이 네 빔 결합에 의한 OPC 발생 시스템을 구성하고 shutter를 이용하여 지속적인 OPC에 대해 연구하였다. 네 빔의 결합에 의해 각각의 OPC를 발생시킨 후에 한 쪽의 shutter를 닫고 다른 쪽의 펄핑 빔에 의한 OPC의 발생을 관찰하였다. 두 개의 펄핑 빔은 결정에 수직하게 입사하고 신호 빔으로 입력한 slide 3의 입력상은 결정의 수직에 대해 40도로 입사하게 하였다. 그림 22는 그림 21의 각 슬라이드를 원형의 상을 입력시켜서 shutter를 닫아서 각각의 OPC를 관찰한 결과이다. Type I은 shutter S2를 닫고 slide 2의 상이 스크린상에 유지하는 시간을 측정한 것이다. 이 시간은 결정 내부에 형성된 굴절을 격자가 유지되는 시간으로 광 저장 시간이 된다. 일반적으로 BaTiO₃ 결정의 기억 시간은 수 초정도인데 결과에서 보는 것과 같이 그 정도는 알려진 것보다 매우 길었다. Type I은 shutter를 닫는 순간 순간적인 OPC의 광세기가 증가하였다가 기하급수적으로 감소한다. 기준빔과 신호빔의 세기의 비가 커지면 이 감소는 더 심하다. 이에 반하여 Type II와 같이 신호빔과 기준빔을 각각 바꾸어서 slide 3을 입력시켜서 shutter 3을 닫고 스크린에 나타나는 OPC를 관찰하면 감소하는 정도는 더욱 심하나 두 빔의 세기 비에 크게 영향을 받지 않는다. Type III은 Type I의 상태에서 slide 3의 상을 입사후 결정 뒷면에서 관찰한 것으로 OPC의 발생시 투과 빔도 발생한다는 새로운 사실을 발견하게 되었다. OPC을 발생하는 격자의 기록과 비슷한 경향을 갖고 있으며 다소 그 감소 정도가 둔하다. 그림 23은 자연 로그상으로 결과를 재정리한 것이다. BaTiO₃ 결정의 기억 시간은 Type I와 Type II의 경우에 각각

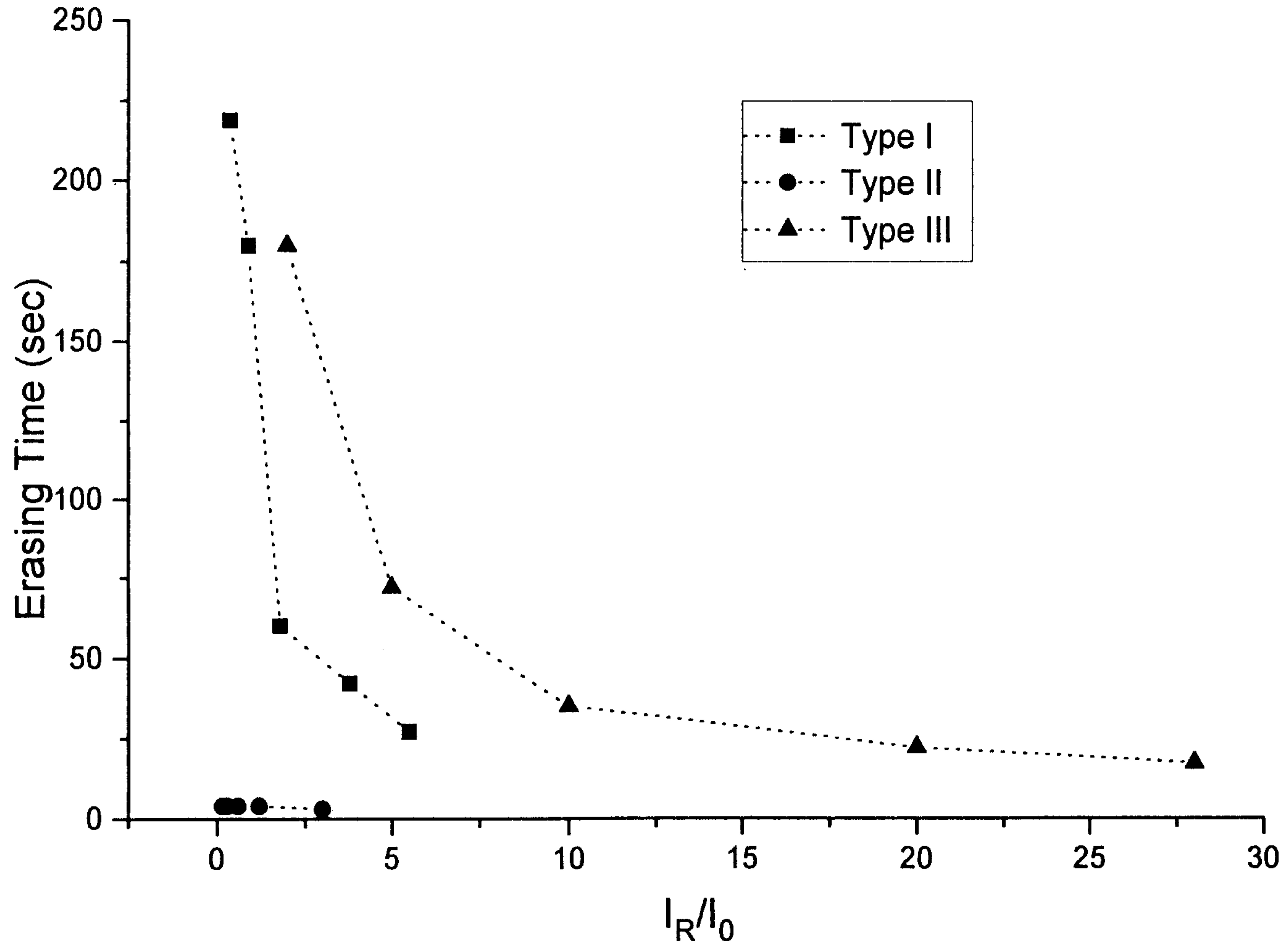


그림 22. 네 빔 결합에 의한 OPC의 제거시간

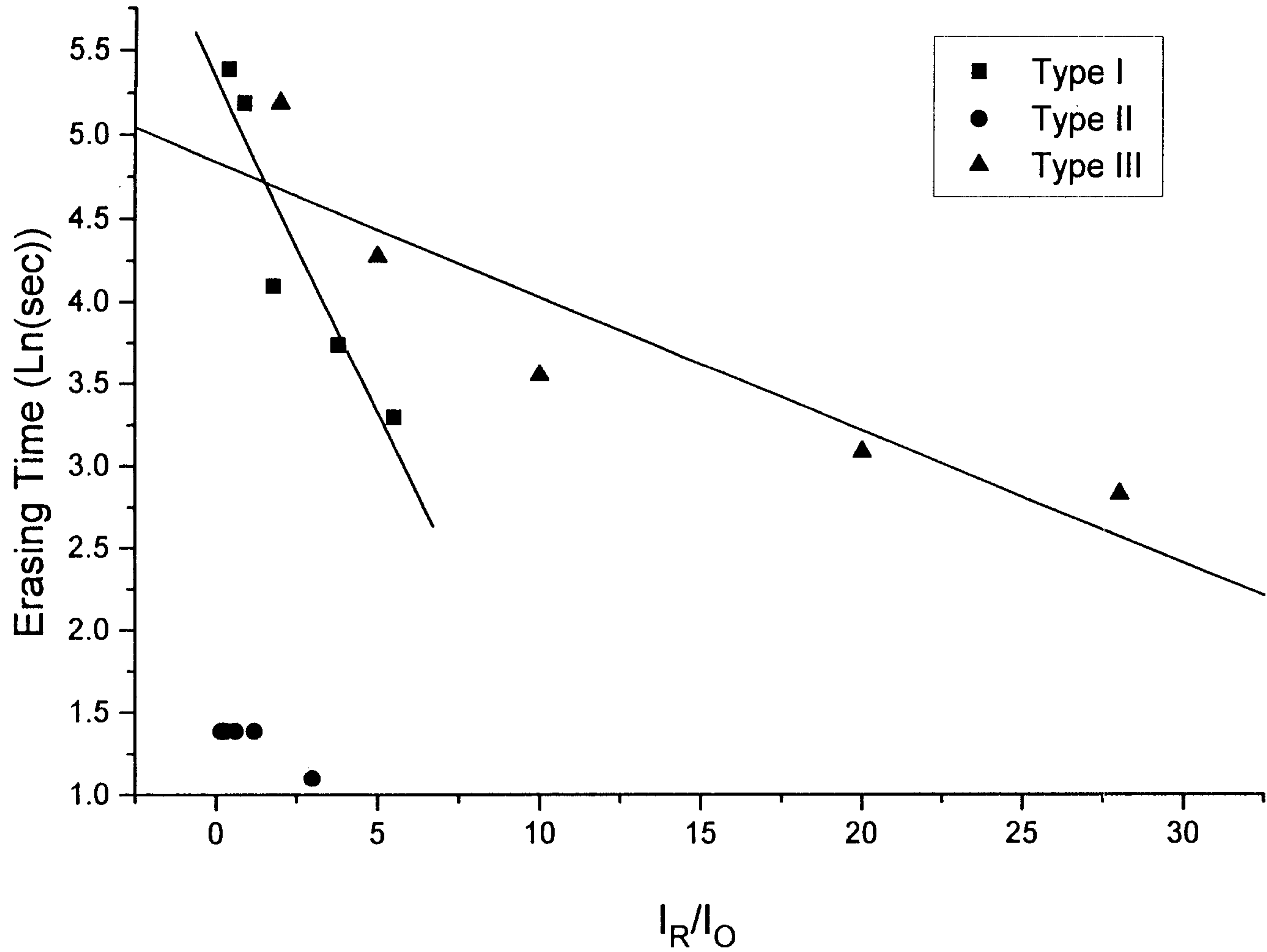


그림 23. OPC의 제거 시간을 자연로그로 도시

$\exp(-0.4I + 5.34)$, $\exp(-0.08I + 4.84)$ (sec)이며 두 빔의 각도를 더 크게 하면 기억 시간이 더 짧아 진다(여기에서 I 는 기준빔과 신호빔의 비임). 이에 부가하여 파장이 다른 기준 빔과 신호 빔을 사용하여 두 빔의 상호 관계를 관찰한 결과 OPC는 각각 SPPC로 생성되며 상호간에 영향은 크게 받지 않으나 슬라이드 3의 입력 빔의 크기를 슬라이드 2에 의한 입력 빔의 중앙 하단부를 덮을 수 있게 크게 하면 슬라이드 2의 OPC는 다소 감소하는 현상을 관찰하였다. 특히 슬라이드 3의 입력 빔의 편광 방향에 따라 달라 졌는데 편광 방향이 SPPC가 잘 발생하는 평면상에 있게 이상 편광이 되면 더 감소하는 현상을 관찰하였다. 감소하는 시간은 수 십 초가 되었다. 이 현상은 네 빔의 결합에서만 아니라 두 빔의 결합에서도 나타난다.

제 3 절 홀로그래프 OPC를 이용한 광정보 처리 기술

광굴절성 결정은 지난 70년대 이후에 주로 광정보처리나 dynamic holography, 광위상공역에 응용이 되어 왔다. 초기에 연구되었던 holographic memory는 현재 광컴퓨팅에 all-optical associative memory로서 연구되고 있으며 nanosecond의 기록 및 재생속도로 수년 동안 기록이 가능하고 3차원 자료를 10^{12} bits/cm³까지 입력이 가능한 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 굴절성 결정을 이용한 기억 특성과 비교하며 여러 가지 광 정보처리의 가능성을 알기 위해 홀로그래프 OPC에 대하여 연구하였다. 이 홀로그래프를 이용한 홀로그래피 광학소자(HOE)는 기존

의 광학소자인 렌즈, 빔 분할기, 간섭 필터, 분광소자 등을 대체할 수 있으며 가격과 제작 상의 문제가 훨씬 용이하다. 앞으로 광 연산에 관련된 광 기술뿐만이 아니라 그 밖의 광 기술 산업에 많은 기여를 할 것으로 사려되므로 많은 연구가 있어야 한다.

그림 24는 홀로그래피 기억 매체를 기억하는 개념을 간단히 도시한 것이다. 기억 매체에 입력상을 FT렌즈를 사용하여 초점화하여 기준 빔과 간섭하게 하므로서 입력 상을 간단히 기록이 된다. 따라서 복잡한 광학적인 장치가 없어도 실상을 재생할 수 있으며 동시에 복잡한 광 정보를 읽을 수 있으며 공간적으로 기억시킬 수 있어 많은 량의 정보를 기억시킬 수 있고 3차원 광정보도 기억할 수 있다. 홀로그래피 기억장치는 개략적으로 그림 25와 같이 구성이 되는데 초점화된 신호 빔은 기록 매체 상에서 재생시 상의 형상을 복귀하기 위해서 Fourier 상의 고주파상을 1차 주파수는 기억이 되게 초점의 위치가 기록매체의 뒤에 형성이 되게 위치시키고 기억 위치를 바꾸기 위해서 기억 매체를 2차원적으로 이동이 되게 장치하여야 한다. 광정보 처리를 위한 간단히 홀로그래피 기억 매체를 재생하기 위해서는 그림 26과 같이 2차원적으로 기억된 광정보를 원하는 정보가 기억되어 있는 위치로 재생 빔을 조사하기 위해서 E-O deflector를 사용한다. 재생된 광정보를 읽을 수도 있고 다른 광 정보처리하는데 응용이 될 수 있다. 간단한 개념으로는 여러 가지 필터를 홀로그램에 기억시키고 있다가 원하는 광정보 처리에 필요한 필터를 재생하여 공간소자나 광굴절성 결정에 조사시켜 필터링을 할 수 있으며 광 연산에 필요한 여러 기본적인 정보를 기억

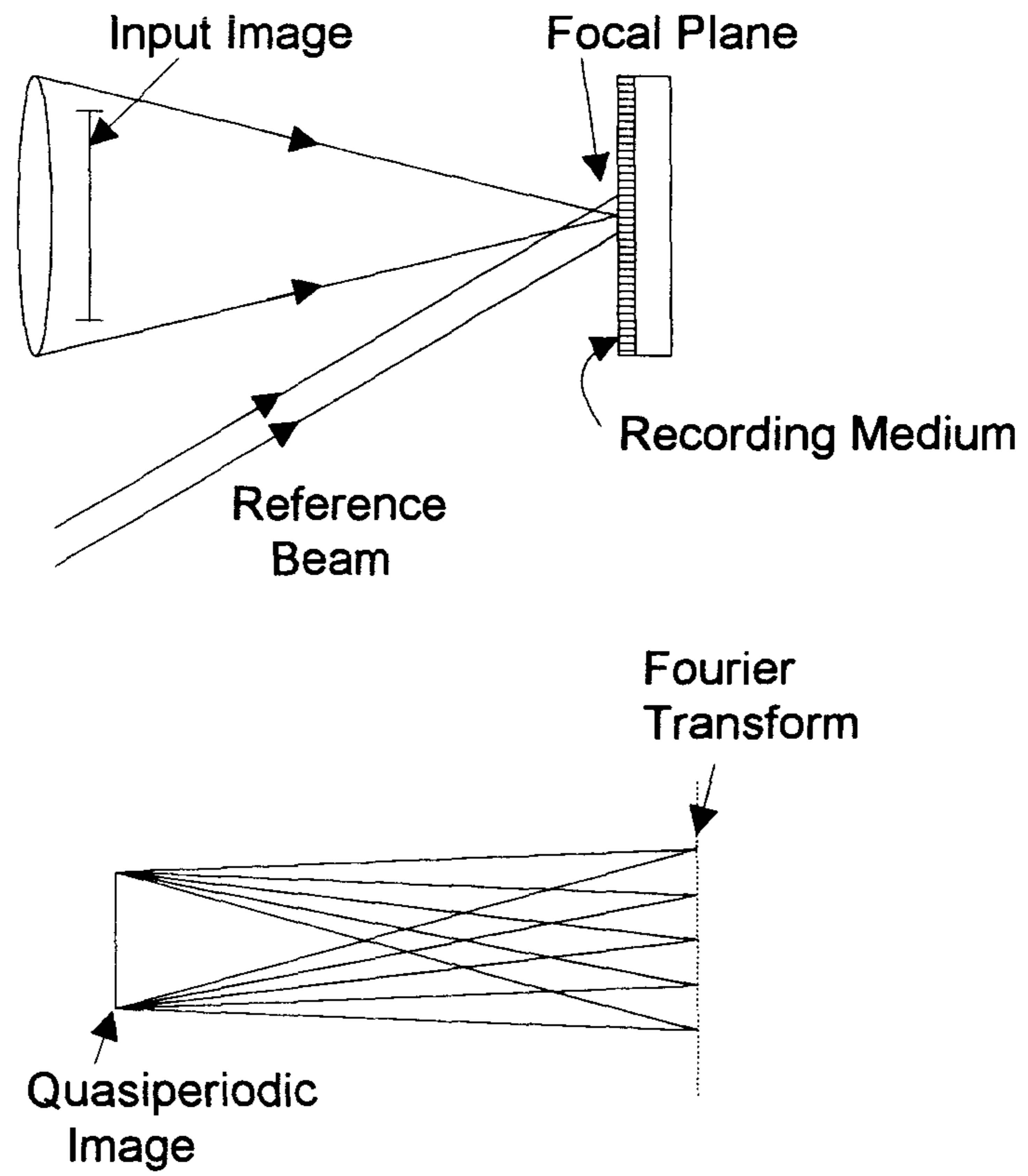


그림 24. 홀로그래피 기억소자의 개념도

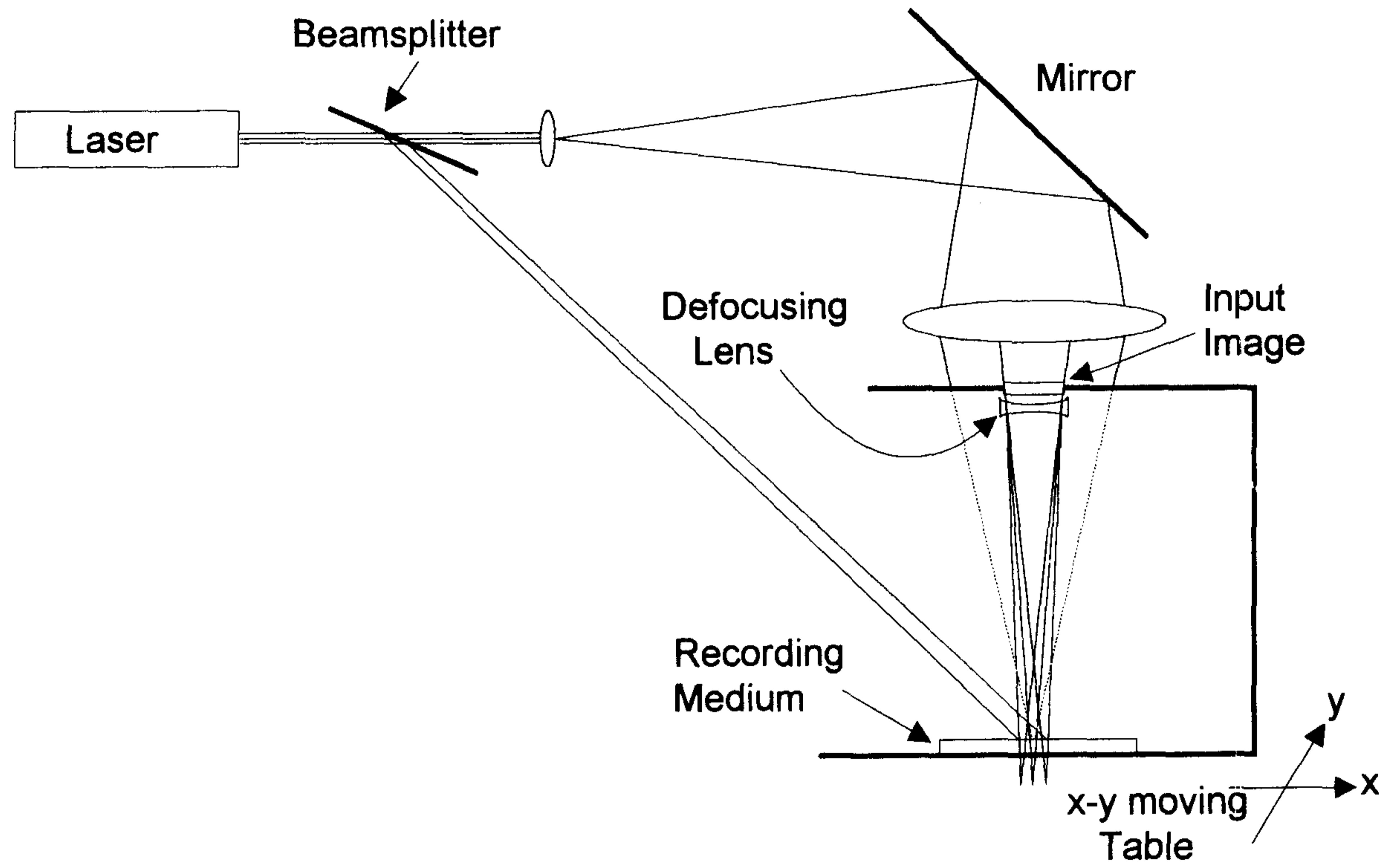
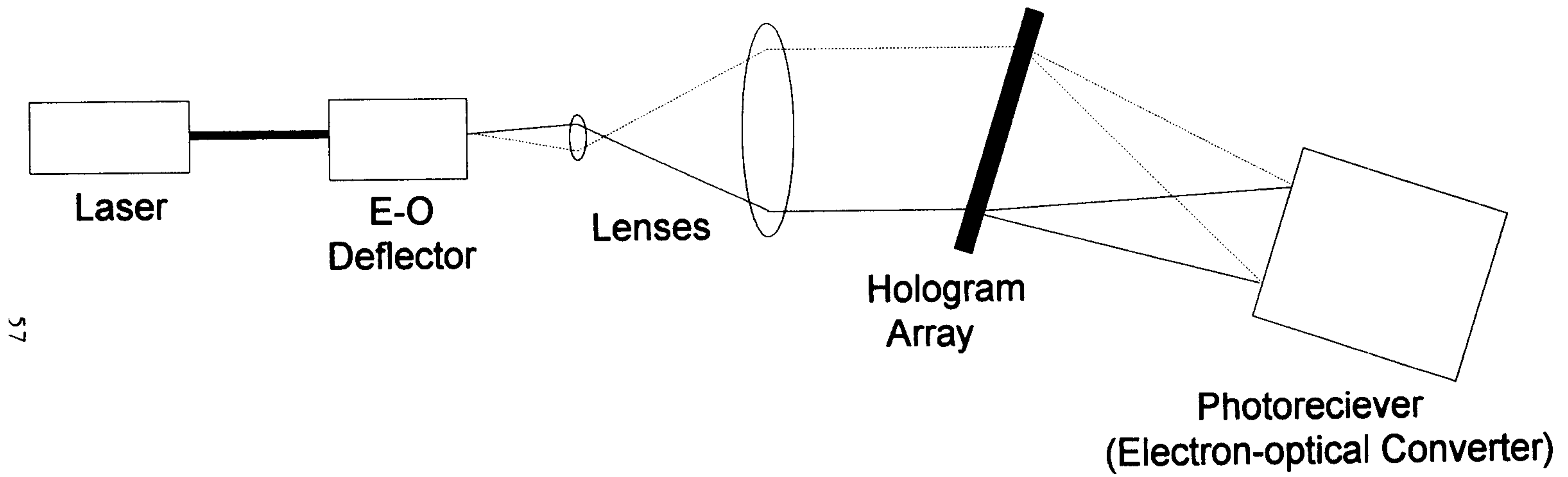


그림 25. 홀로그래피 기억소자를 제작하기 위한 실험 구성도



57

그림 26. 홀로그래피 기억소자를 재생하는 장치 예

하고 있다가 필요시 재생하는 응용이 있다. 홀로그램 기억장치는 2차원적인 평면판을 사용할 수 있으나 취급상의 문제 및 크기에 있어 제한을 받으므로 최근에는 해상도는 다소 떨어지지만 용량이 큰 thermoplastic film를 이용하는 방법을 사용하고 있다. 그림 27은 thermoplastic film 기억장치의 개략도이다. 이 장치는 넓은 면을 기억매체로 사용하므로 특히 광학적인 장치가 설치되기 힘든 환경에서 기억 장치로 유용하다. 그림 25의 장치를 이용하여 그림 28과 같은 홀로그래피 기억매체를 만들었다. 최근에 들어 많은 연구가 행하여지고 있는 dichromated gelatin(DCG) 감광재료를 사용하면 좀더 높은 회절 효율을 갖는 기억장치를 구성할 수 있으나 방법상으로는 큰 차이가 없으므로 흔히 구입할 수 있는 silver halide계의 감광재를 이용하여 25 x 15개의 홀로그램을 2mm 간격으로 기억시켰으며 각 홀로그램의 크기는 1mm x 1.2mm였다(그림 28의 (a)). 기억시킨 홀로그램은 표 1과 같은 현상과 표백과정을 겪어 재생하였다. 슬라이드 상을 입력시킨 그림 28(a)는 다소 스펙클 패턴이 있으나 그림 28(b)와 같이 광정보를 디지털하여 각각 입력시킨 상은 재생후에 매우 높은 선명도를 가지므로 앞으로 많은 연구가 있어야 한다. 그림 29는 각 홀로그램의 간격을 달리하였을 때 각 홀로그램이 갖는 회절 효율을 측정한 결과이다. 초점에 가까우면 간격이 넓을 때 효율이 좋으며 초점에서 다소 떨어질 때 효율은 최고치를 가졌다. 따라서 스펙클의 잡음과 효율을 고려하여 그림 28의 (a)를 기록하였다.

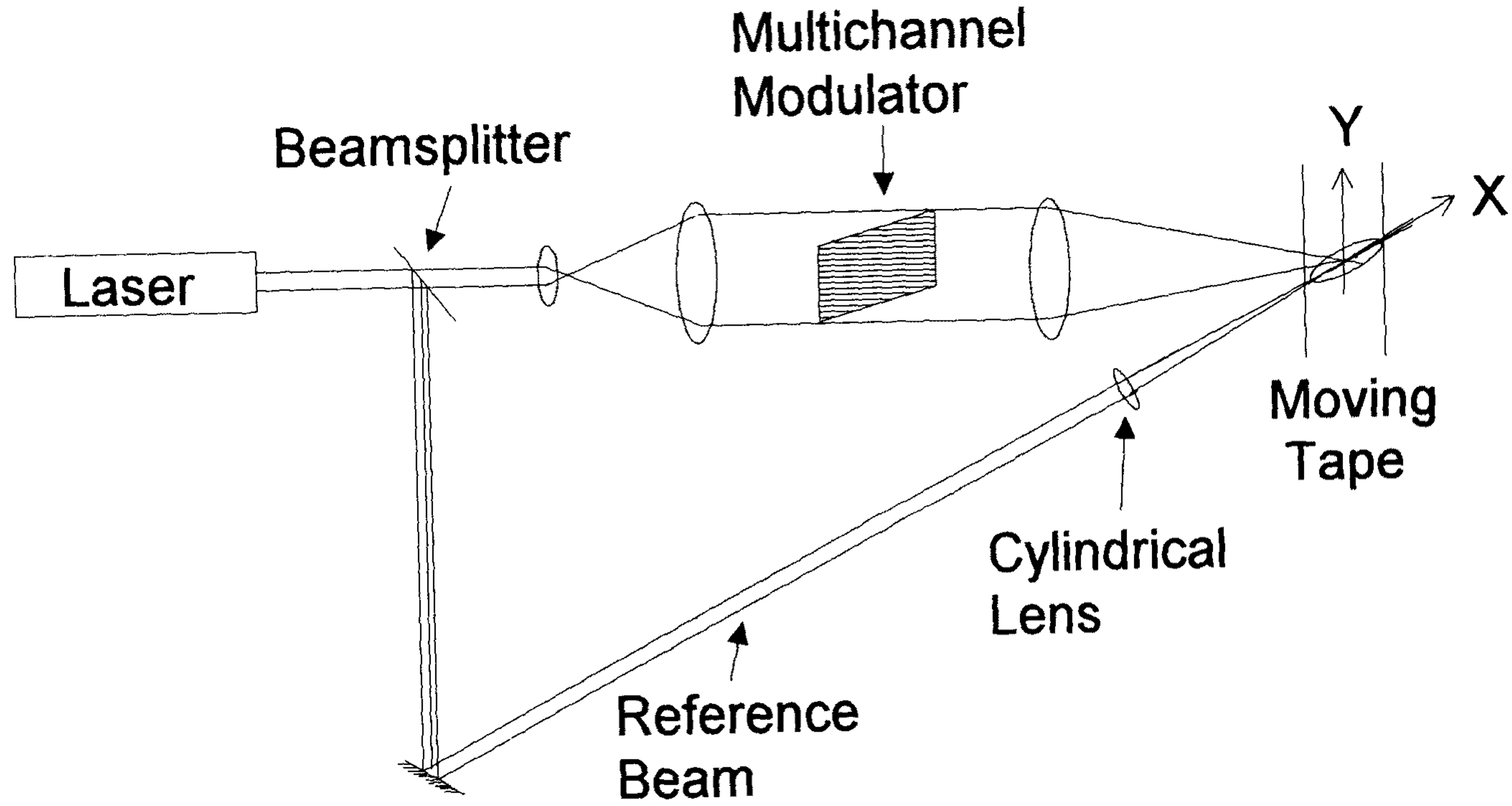


그림 27. 광학적인 환경의 영향에 장점을 갖고 있는 Thermoplastic Film 기억장치의 개략도

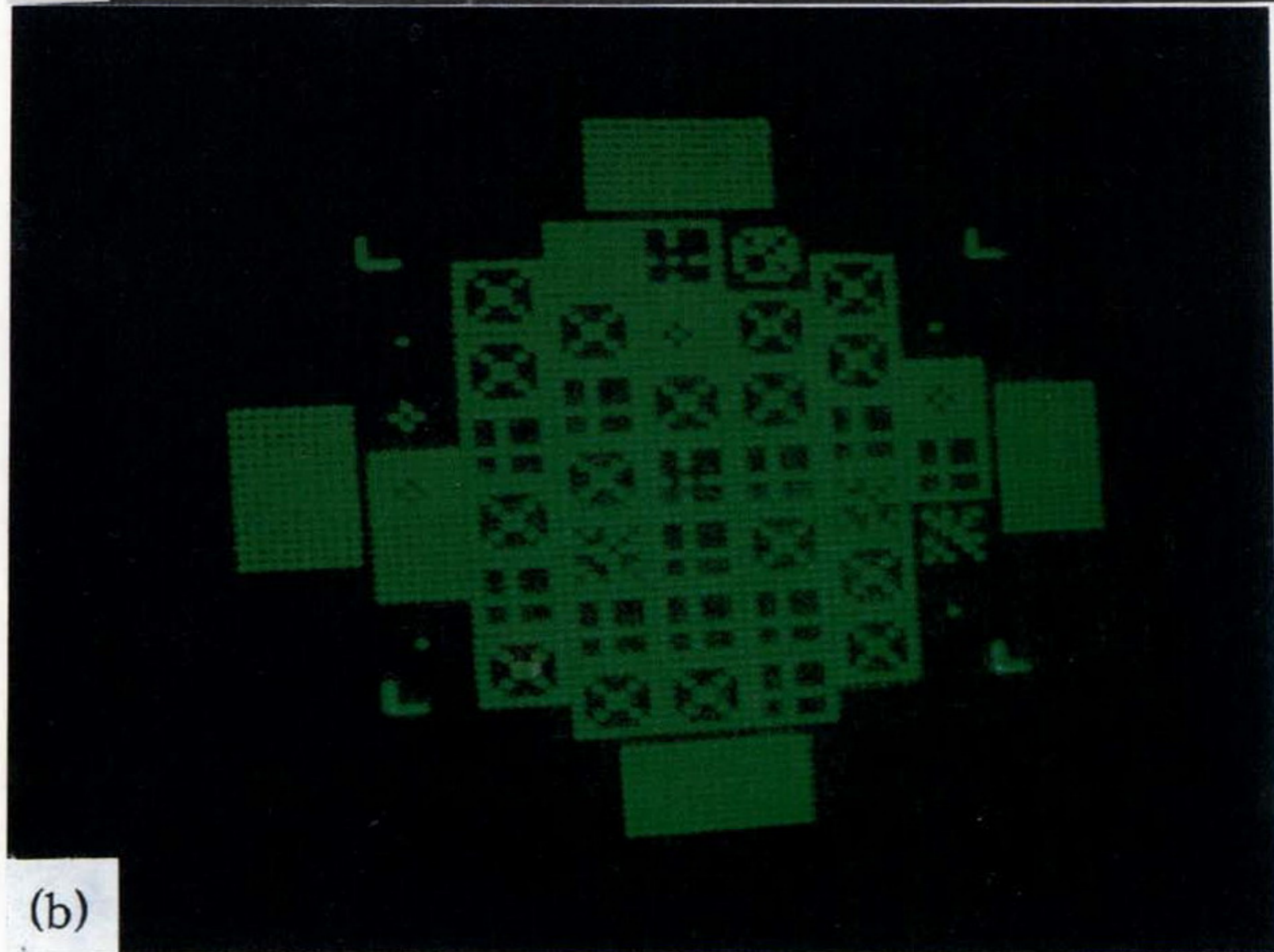
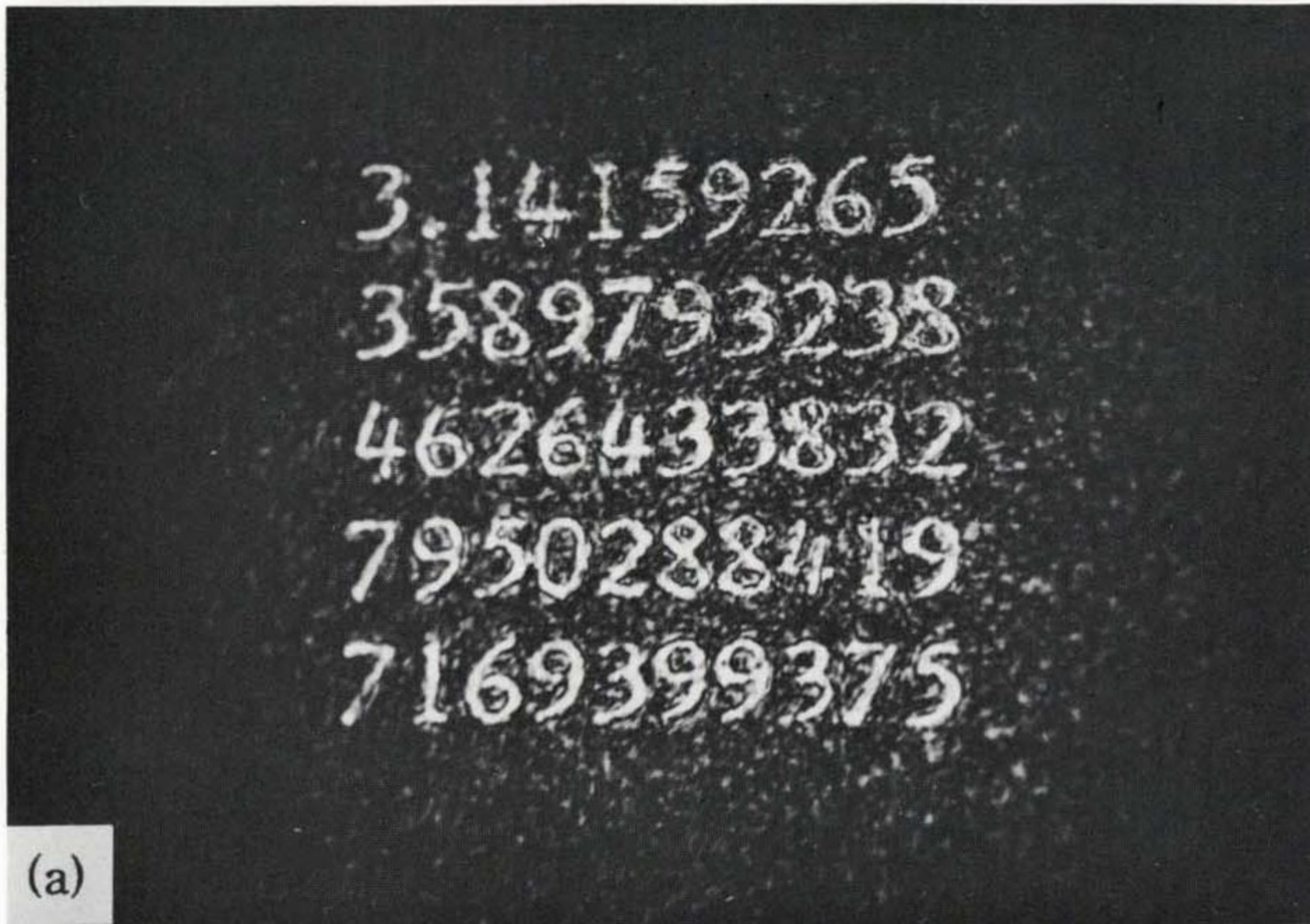


그림 28. 홀로그래피 기억소자에 있는 재생상의 예

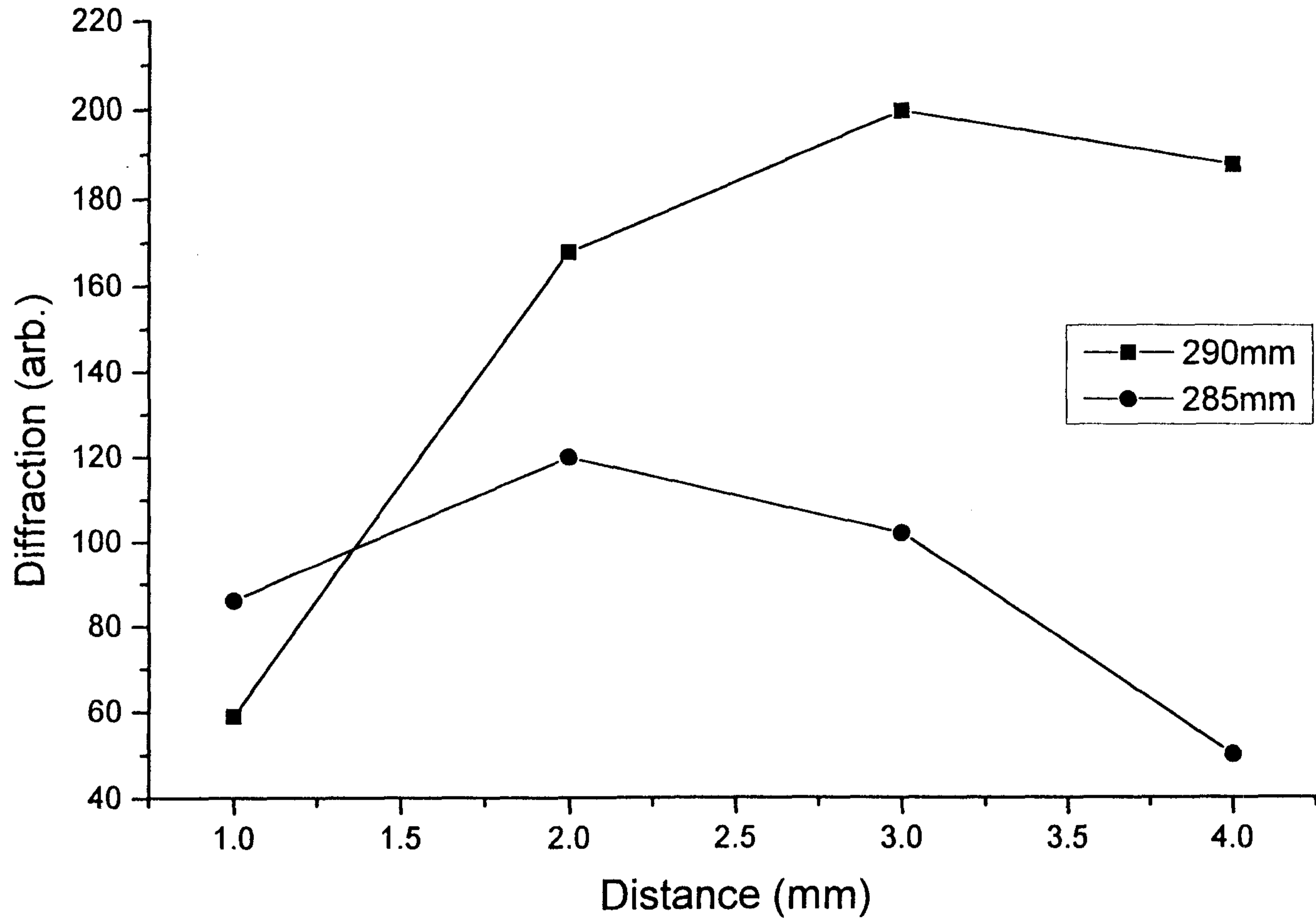


그림 29. 초점거리가 300mm인 렌즈를 사용하여 기록한 기억 소자의 기록 간격에 따른 상대적인 회절 효율

표 1. 투과형 홀로그래프의 현상 및 표백과정

과 정	약 품	소 요 시 간
1. 현 상	KODAK D-19	3분
2. 행 굵	증류수	1분30초
3. 표 백	표백용액	맑아 질때까지
	Potassium Dichronate 0.8g (K ₂ Cr ₂ O ₇) Sulfic Acid (H ₂ SO ₄) 1cc 증류수 1000cc	
4. 행 굵	증류수	7분
5. 건 조	50% 메탄올	2분
	100% 메탄올	2분
	음지 건조	1시간

위에서 언급한 기본적인 홀로그래피의 특성을 이용하여 기억소자로서뿐만이 아니라 광 interconnection에 응용이 될 수 있는데 그림 30은 그 한 예이다. 최근에 들어 미소 소자의 기술이 발달됨에 따라 외부에서 필요한 입력정보를 광으로 입력시키는 요구가 증대되고 있다. 정확히 미소 부분에 원하는 광 정보를 입력시키는 기술이 요구되므로 홀로그래프 소자를 이용하여 이의 실현 가능성을 연구하였다. 이는 광 정보를 처리하는데 기반 기술로 사용이 될 수 있으며 그 밖에 광학적

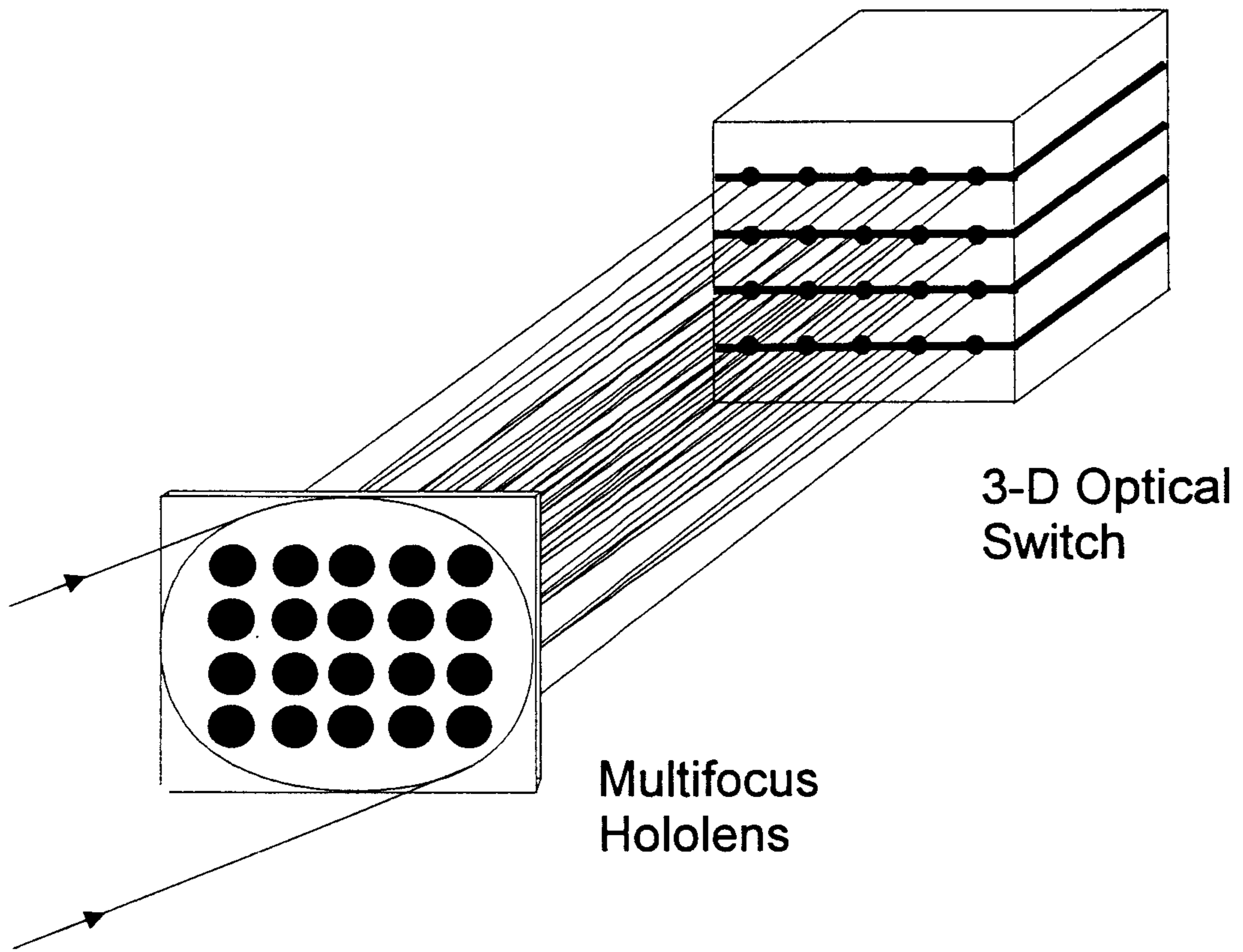


그림 30. 홀로그래피 소자를 이용한 광 Interconnection의 예

측정기기 및 광 기술 전반에 응용이 될 수 있는 기반기술로 여겨진다. 3차원적으로 광 스위치를 구성하였을 때 미소하게 초점화 시킨 정보를 기억하고 있는 홀로그램 소자를 이용하여 원하는 위치에 광원을 입사시킬 수 있다. 그림 32의 (b)는 이러한 개념을 실험한 홀로그램 소자이다. 5 x 5 의 홀로그램을 기억시켜서 동시에 재생 빔을 조사시켜 5 x 5 의 화소를 재생하여 각각의 빔을 공간적으로 제어 가능한 소자에 입력시킬 수 있는 것이다. 이와 다른 원리로 한 홀로그램에 다중으로 노출시켜 기록한 그림 31과 32((b)는 제외)은 이웃하고 있는 빔과 간섭이 일어 나지 않는 해상도를 분석하기 위해서 실험한 결과이다. 직경 5mm의 홀로그램에 10 μ m, 100 μ m, 500 μ m간격으로 각각 4개의 상을 기억시킨 것과 200 μ m간격으로 60개의 상을 다중으로 기억시킨 홀로그램을 재생한 것이다. 즉 다시 말해서 하나의 입력 빔을 임의의 원하는 수 만큼의 빔으로 분할하여 같은 광 정보를 여러 부분에 입력시킬 수 있는 interconnection 방법이다. 그림 33은 앞 그림의 각 결과를 화상으로 잡아서 분해능을 본 것이다. 100 μ m정도는 정확한 분해능을 가지고 있으며 그림 34와 같이 60개의 분해도 크게 큰 잡음이 없이 가능하다.

이러한 광 interconnection 개념을 광 연산에 적용시킬 수 있다. 최근에 개발된 광굴절성 결정을 이용하여 행렬-행렬 곱하기는 그림 35와 같은 개념으로 구성이 된다⁽¹⁴⁾. 네 개의 입력 빔을 기반으로 한 2 x 2행렬과 1 x 2행렬의 곱은 재생 빔에 의해 곱의 값을 연산할 수 있다는 개념인데 이 실험을 재현하기 위해서 그림 21과 같은 네 빔의 결

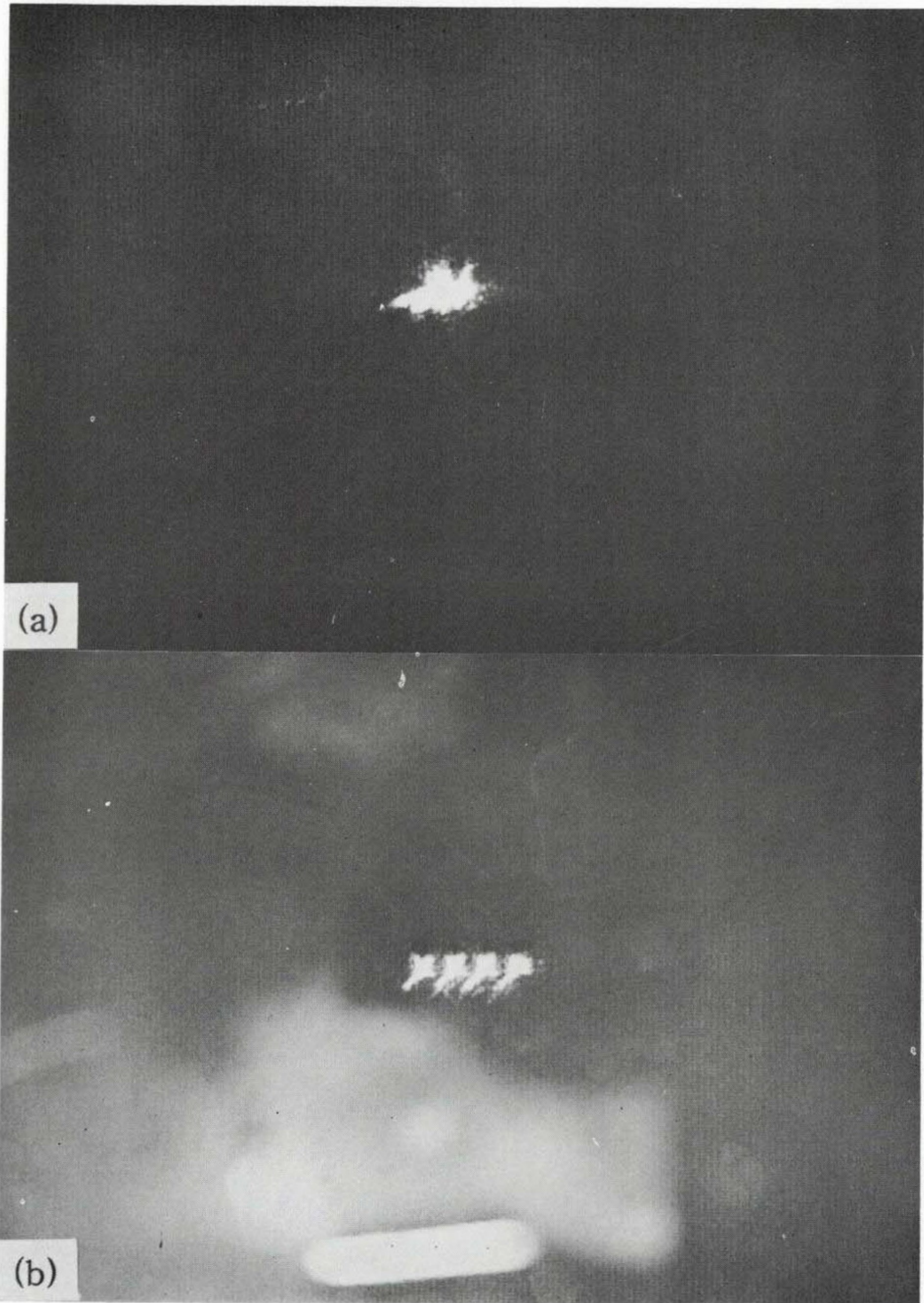


그림 31. 한 개의 홀로그램에서 분리되어 나온 빔의 분해가능한 정도를 알기 위해 실험의 결과

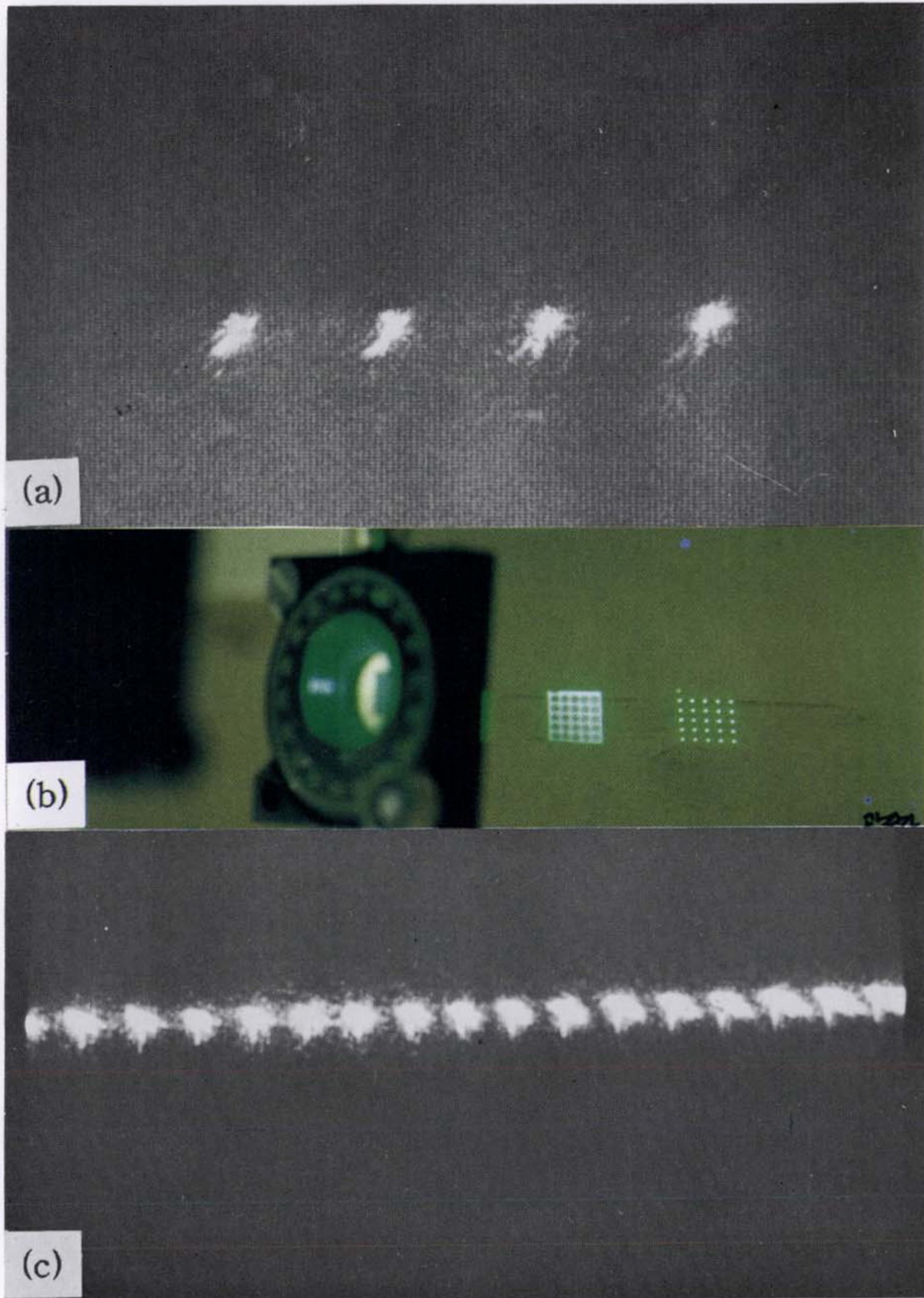
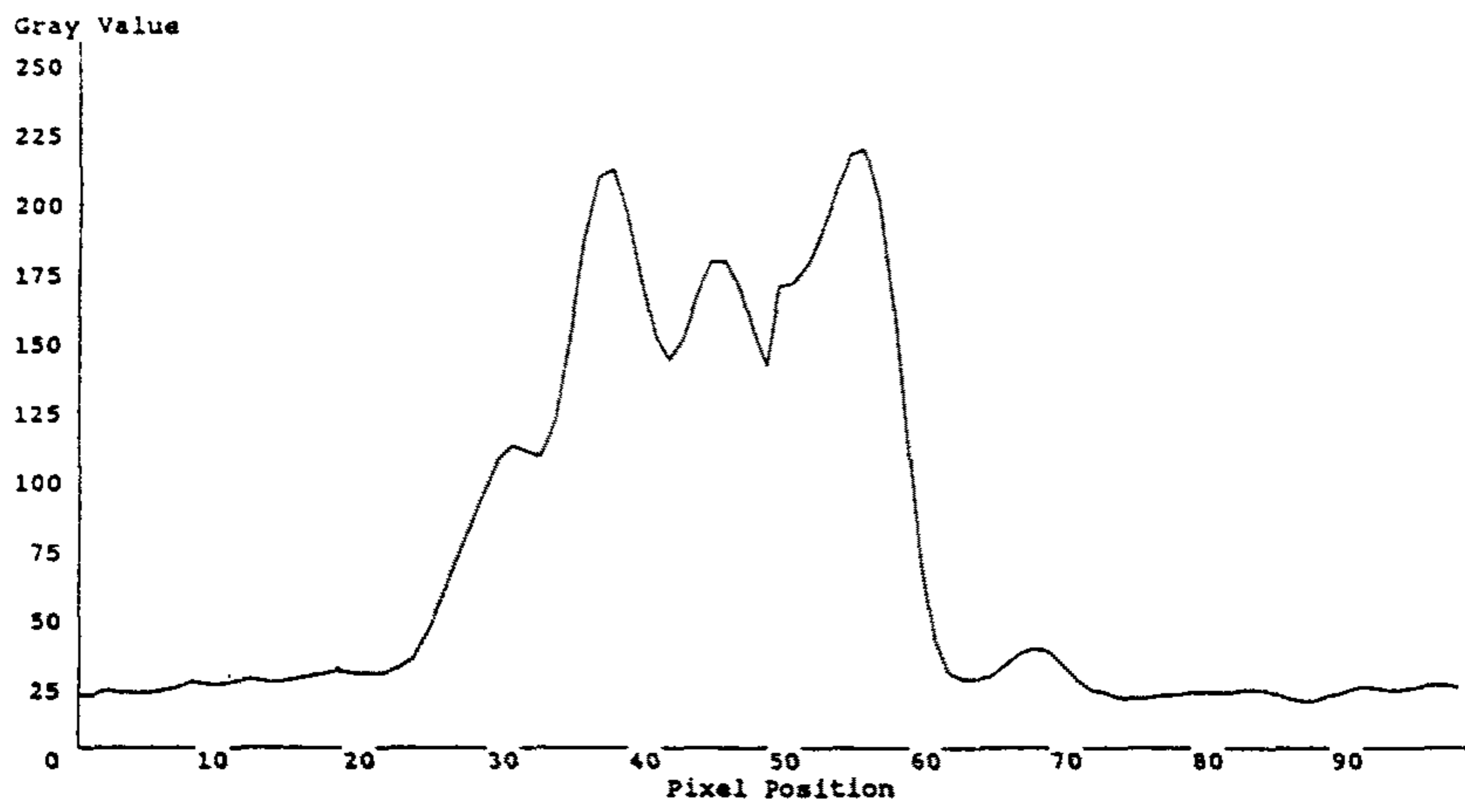
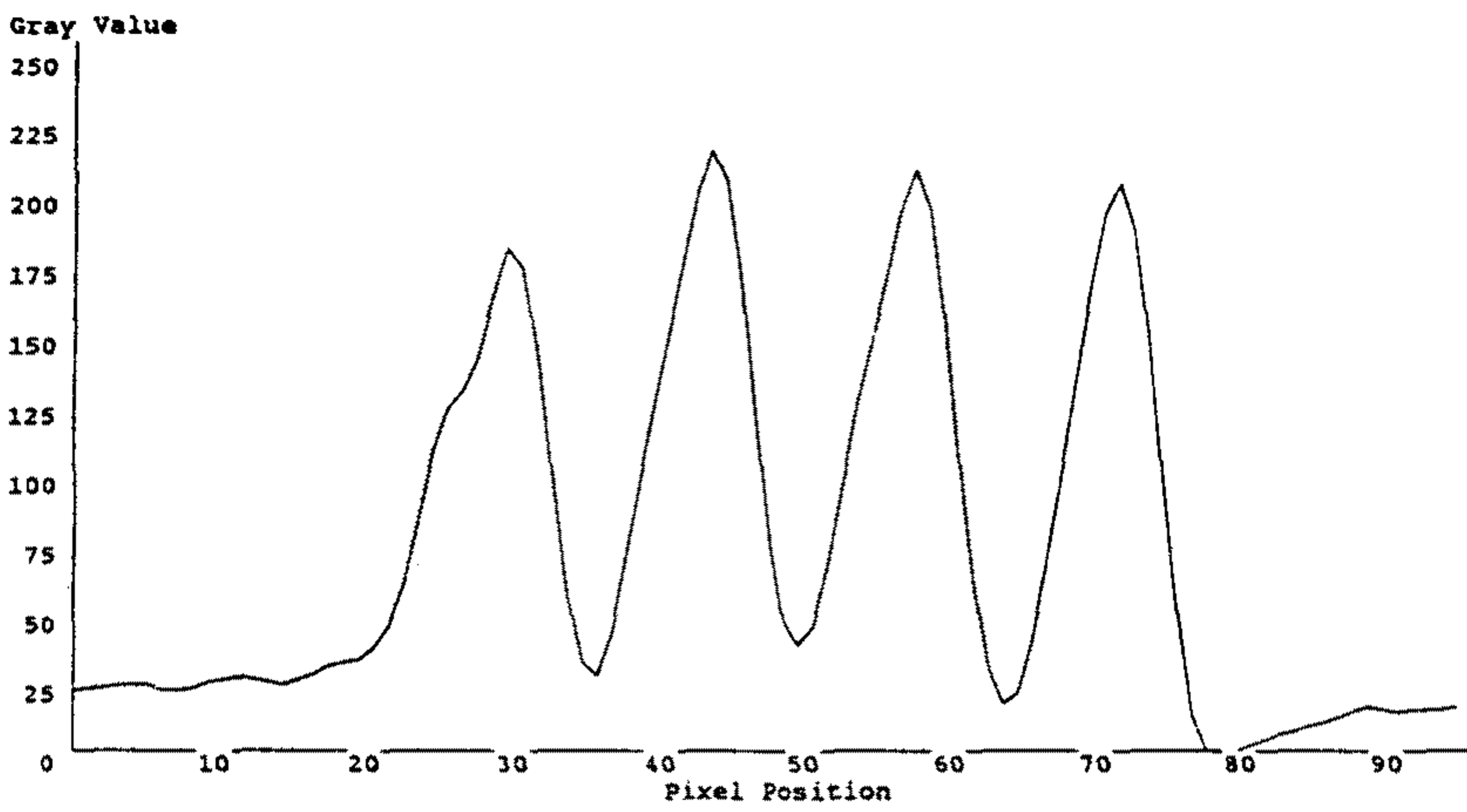


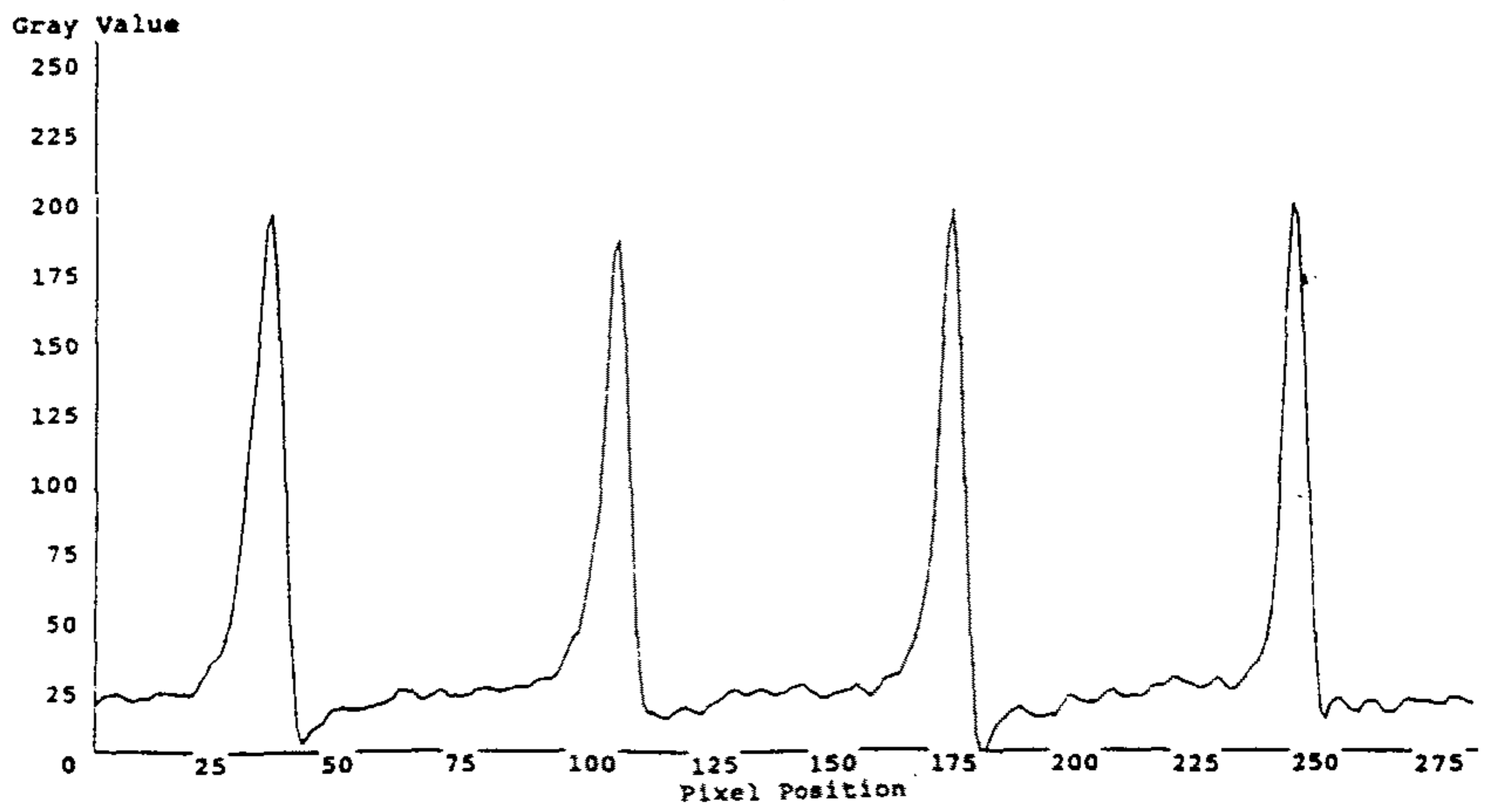
그림 32. (a) 한 개의 홀로그램에서 분리되어 나온 빔, (b) 5 x 5 행렬로 구성된 광 Interconnection용 홀로그래피 소자, (c) 한 개의 소자에서 60개의 Interconnection용 소자 상



(a)



(b)



(c)

그림 33. 한 개의 홀로그래피 소자에서 분리되는 빔 간격의 분해능을 위한 Gray 레벨도

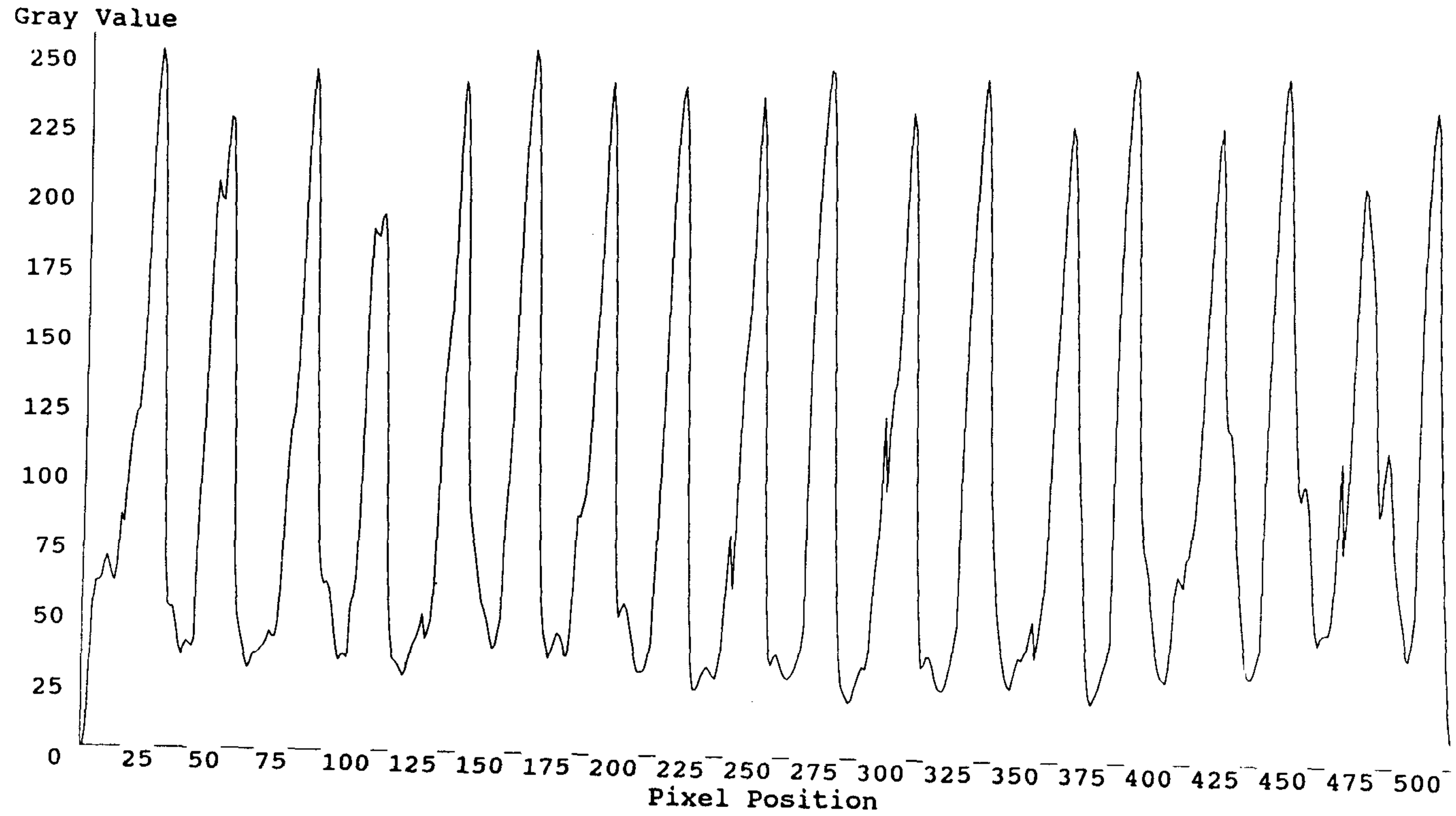


그림 34. 한 개의 홍로그래피 소자에서 분리되는 빔의 분해능을 위한 Gray 레벨도

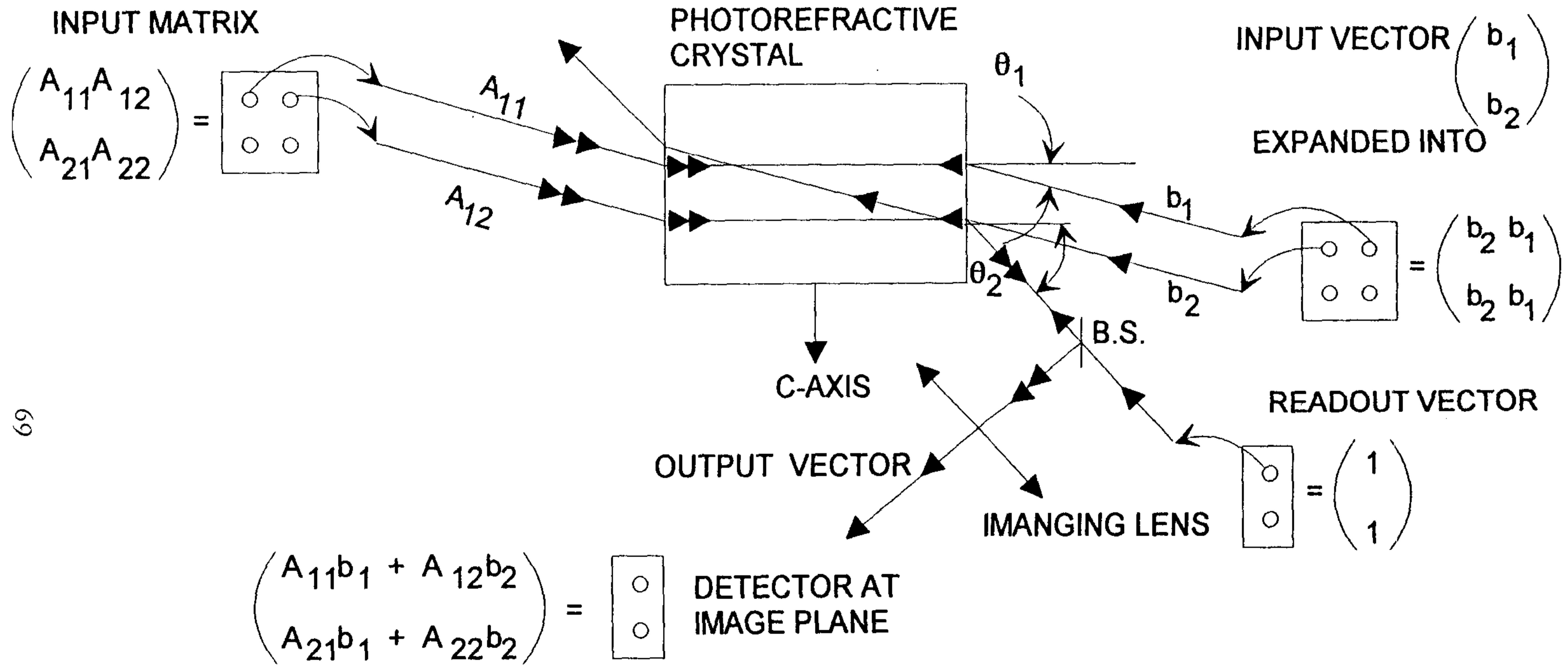


그림 35. 광굴절성 결정을 이용한 행렬-행렬 곱의 개략도

을 구성하여 실험을 하였다. 각각의 입력은

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

이며 이론적인 결과는

$$C = AB = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

이다. 그림 36은 이의 결과를 나타낸 것으로 (b)는 재생 빔으로 사용한 입력상이고 (a)는 연산의 결과이다. 이를 화상으로 잡아 gray 레벨로 보면 그림 37과 같이 원하는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 연산에 몇가지의 문제점이 있는데 입력으로 다양한 행렬을 입력시키기 힘들어 몇 가지의 특정한 형태의 행렬의 연산만이 가능하고 결정내에서 빔의 위치를 정확히 일치시켜야 하는 어려움이 있다. 이에 반하여 앞에서 언급한 광 interconnection에 사용하는 홀로그래피 소자를 이용하여 연산을 할 경우에 많은 이점을 갖게 된다. 그림 38은 홀로그램을 이용하여 $n \times n$ 행렬을 곱하는 원리도를 나타낸 것이다. 입력의 광원을 특정 방향으로 분산되는 홀로그래피 렌즈를 이용하여 곱하기를 수행하고 다시 cylindrical 렌즈로 합하여 결과를 나타낸다. 이를 실험하기 위해서 그림 39와 같은 광학 시스템을 구성하였다. 각각의 입력은 간단히 슬라이드로 하였으며 그림 40과 같은 입력을 예로 하였다. 결과는 광굴절성 결정을 사용하여 행렬-행렬 곱을 한 경우보다 더 정밀

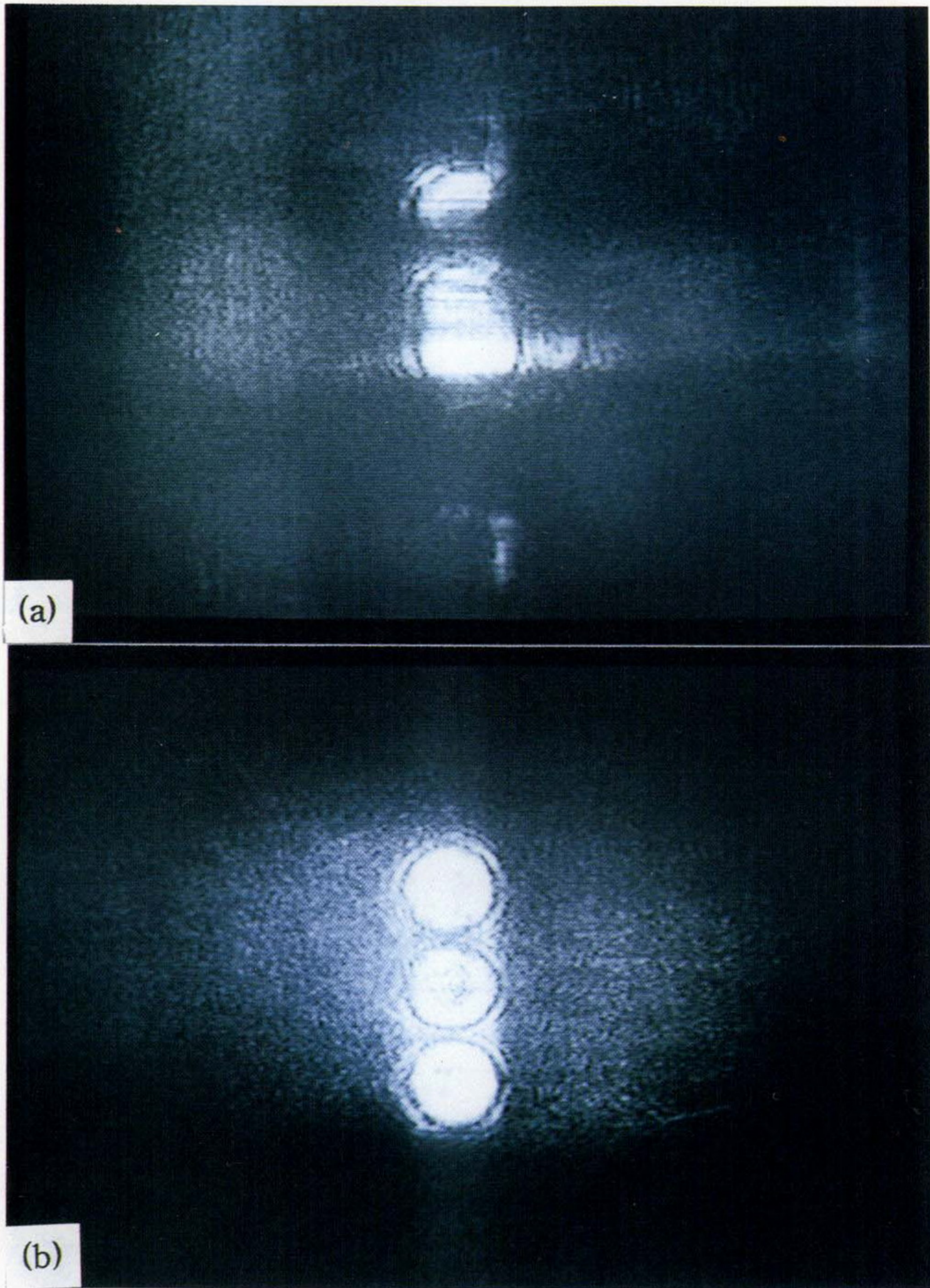
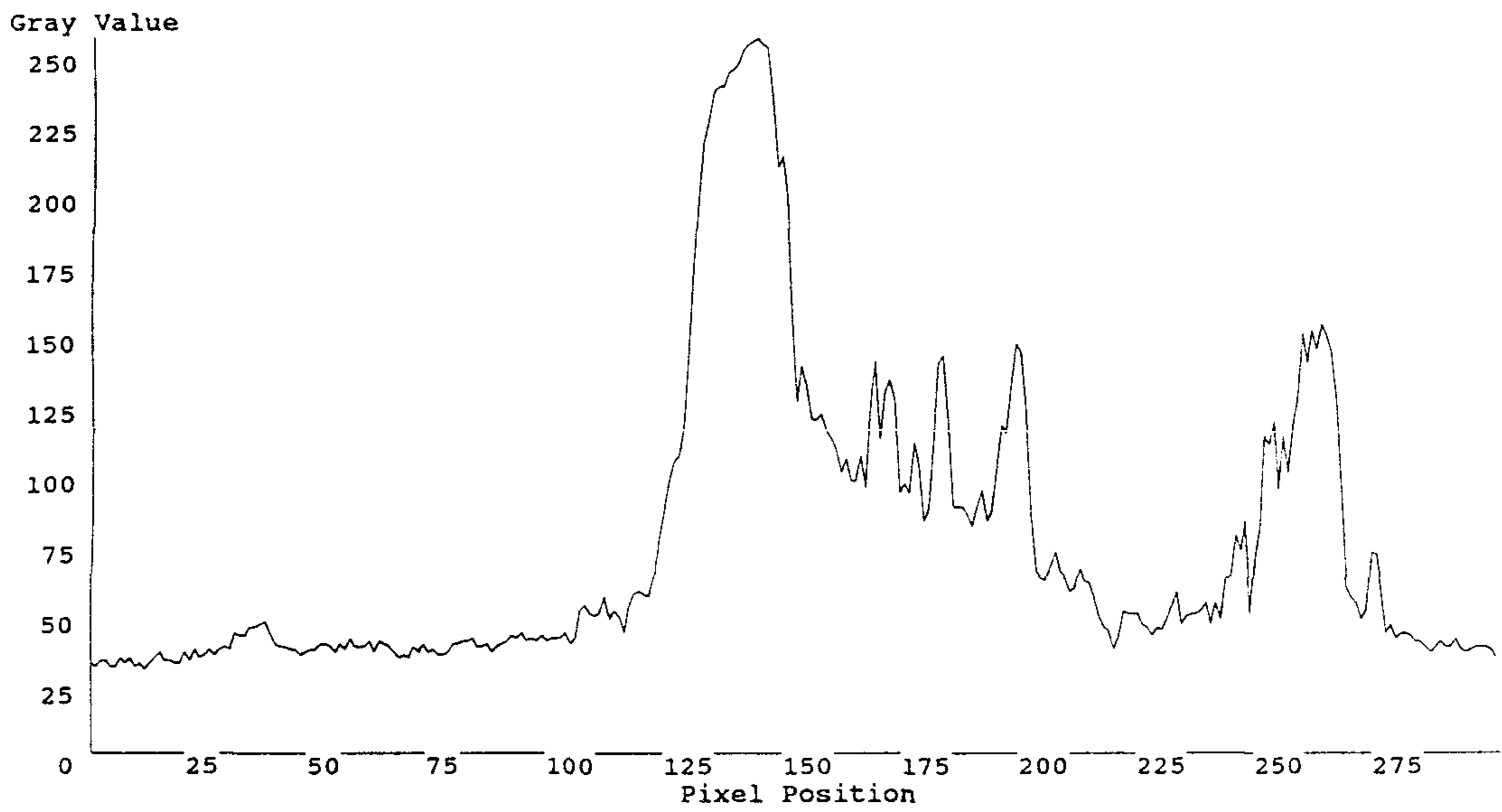
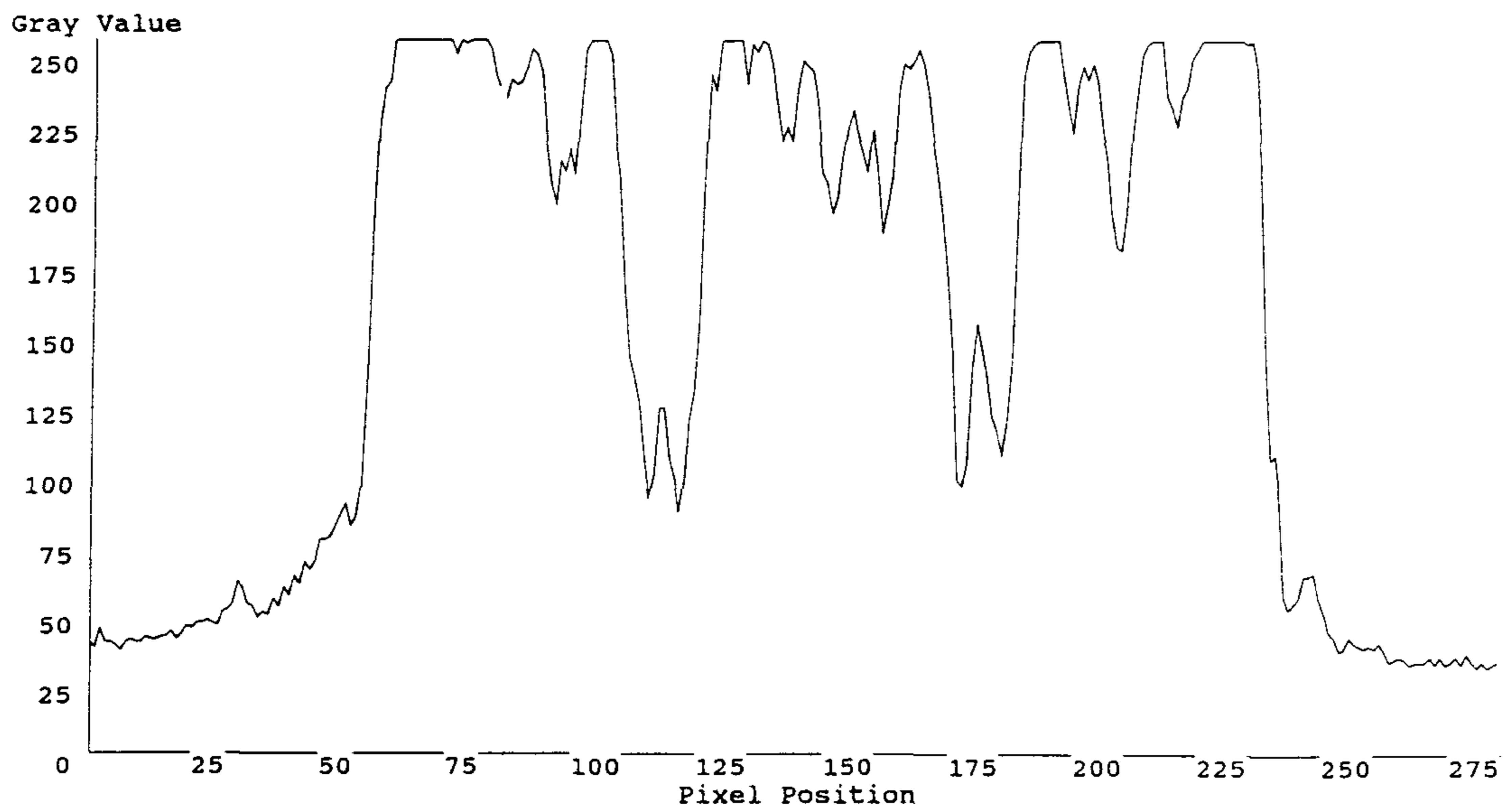


그림 36. 광굴절성 결정을 이용한 행렬-행렬 곱의 실험 결과 예



(a)



(b)

그림 37. 광굴절성 결정을 이용한 행렬-행렬 곱의 실험 결과를 Gray 레벨로 도시

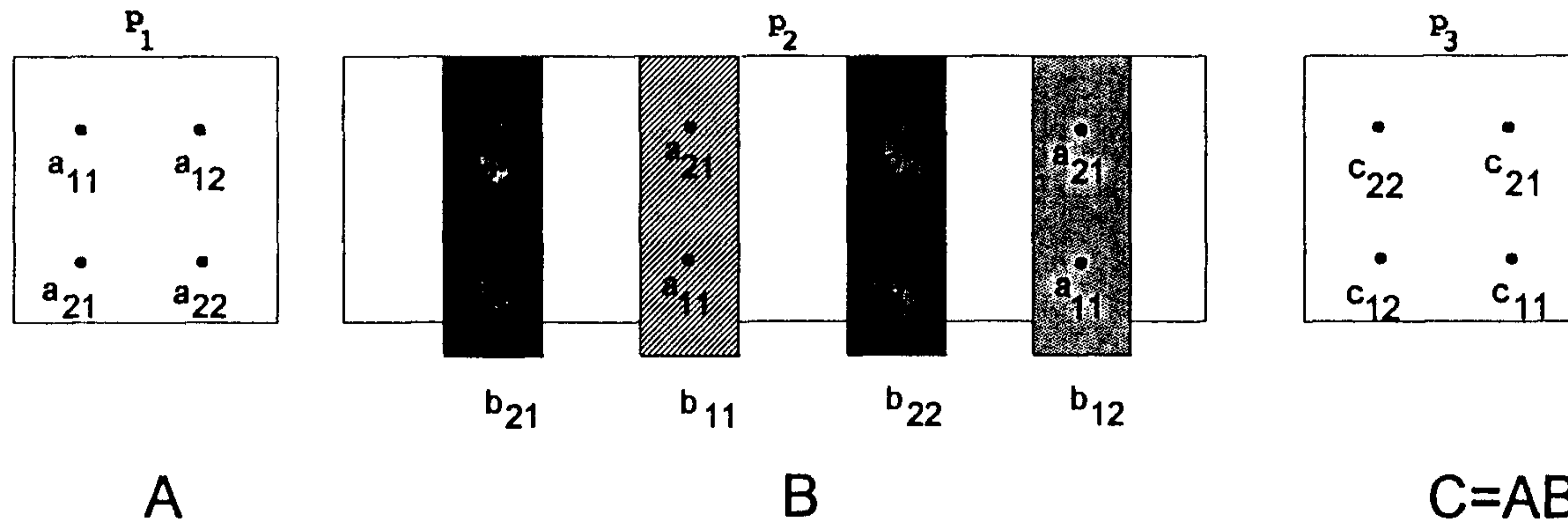
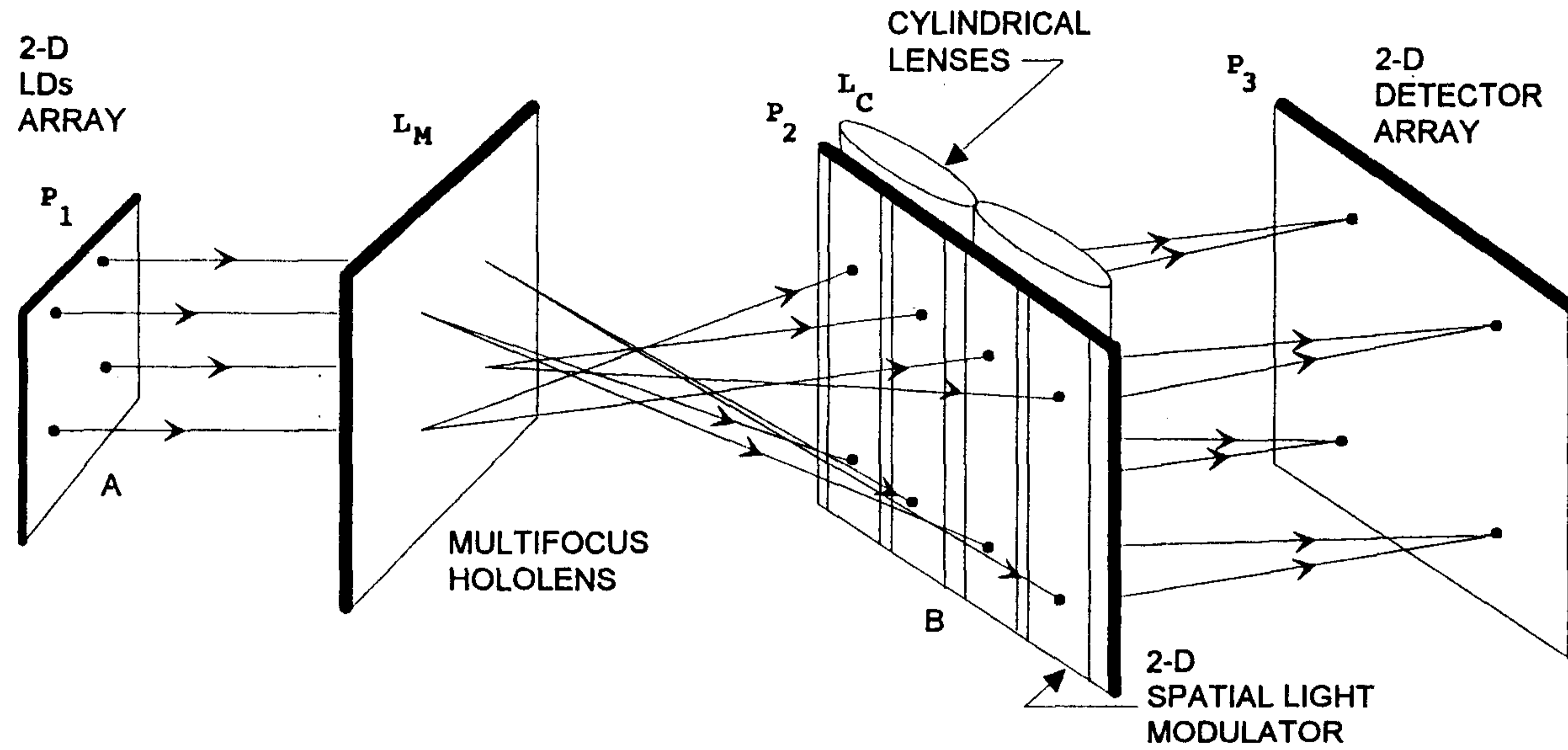


그림 38. 홀로그래피 소자를 이용한 행렬-행렬 곱의 개략도

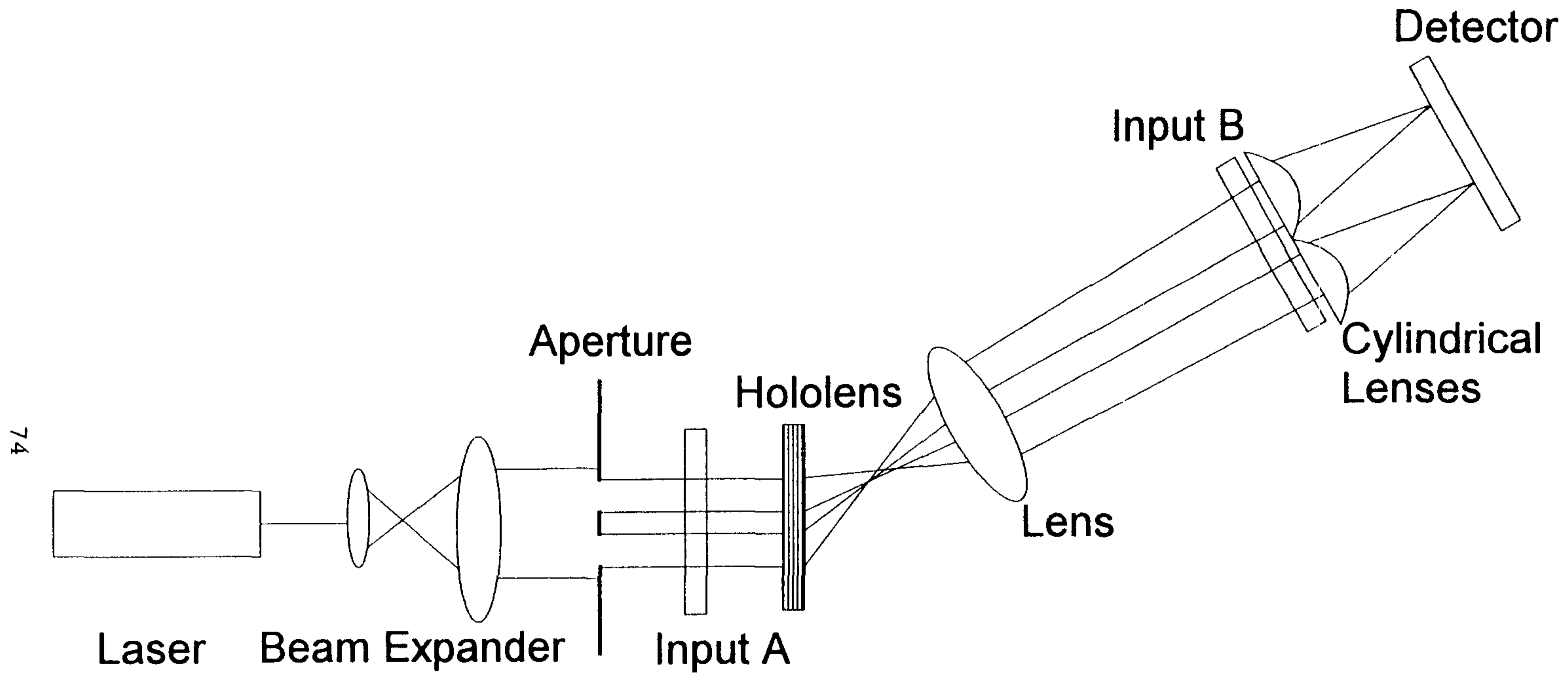


그림 39. 홀로그래피 소자를 이용한 행렬-행렬 곱의 실험도

$$\begin{array}{c} \text{A} \\ \left(\begin{array}{cc} 0.158 & 0.379 \\ 0.158 & 0.379 \end{array} \right) \end{array} \times \begin{array}{c} \text{B} \\ \left(\begin{array}{cc} 0.016 & 0.343 \\ 0.016 & 0.343 \end{array} \right) \end{array} = \begin{array}{c} \text{C} \\ \left(\begin{array}{cc} 0.0085 & 0.1842 \\ 0.0085 & 0.1842 \end{array} \right) \end{array}$$

$$\text{Experimental} \left(\begin{array}{cc} 0.0085 & 0.166 \\ 0.0085 & 0.134 \end{array} \right)$$

$$\text{Error \%} \left(\begin{array}{cc} 0 & -9.9\% \\ 0 & -27.3\% \end{array} \right)$$

75

그림 40. 홀로그래피 소자를 이용한 행렬-행렬 곱의 한 예

하고 좀더 복잡한 연산이 가능하였다. 단 문제점은 더 큰 행렬을 연산 하려면 더 복잡하고 많은 홀로그래피 소자가 요구된다는 점이다. 따라서 연산할 수 있는 행렬의 크기가 제한을 받게 된다.

광 interconnection의 개념을 다른 기술에 적용하면 그림 41과 같이 왜를 일으키는 특정 물질을 통한 interconnection를 할 수 있다. 그림에서 렌즈 L4를 이용하여 광의 전파가 난이한 매질을 통과한 광을 홀로그램에 기록하여 이를 다시 재생할 때 위상공액파의 특성에 의해 기록 당시의 상으로 재생이 가능하다. 그림 42의 (a)는 이 실험에서 사용된 5 x 3 행렬로 다중 기록된 홀로그램을 재생한 결과이며 그림 42의 (b)는 이 특정 매질을 통과하여 특정한 형태의 정보를 재생한 결과이다. 그림 43은 각 정보의 간격을 100 μ m, 150 μ m, 400 μ m으로 기록한 것을 gray 레벨로 나타낸 것이다. 이 특정 매질은 광 기술에서 많이 사용하고 있는 광파이버에 적용이 가능하며 광파이버를 통해 정보 처리를 하는 경우에 매우 유용하다고 본다. 또한 공간변조소자를 사용하는 경우에는 전송된 광정보를 변조할 수 있으므로 광 interconnection 개념으로 사용을 할 수 있다.

제 4 절 Novelty Filter를 이용한 광 정보 처리

OPC개념을 응용하여 입력면에 있는 입력 정보 중에서 기존의 입력중 새로운 정보만 정보로 처리하는 novelty filter를 구성할 수 있다⁽³¹⁾. 제 2차년도 novelty filter의 구성과 달리 앞에서 언급이 된 두

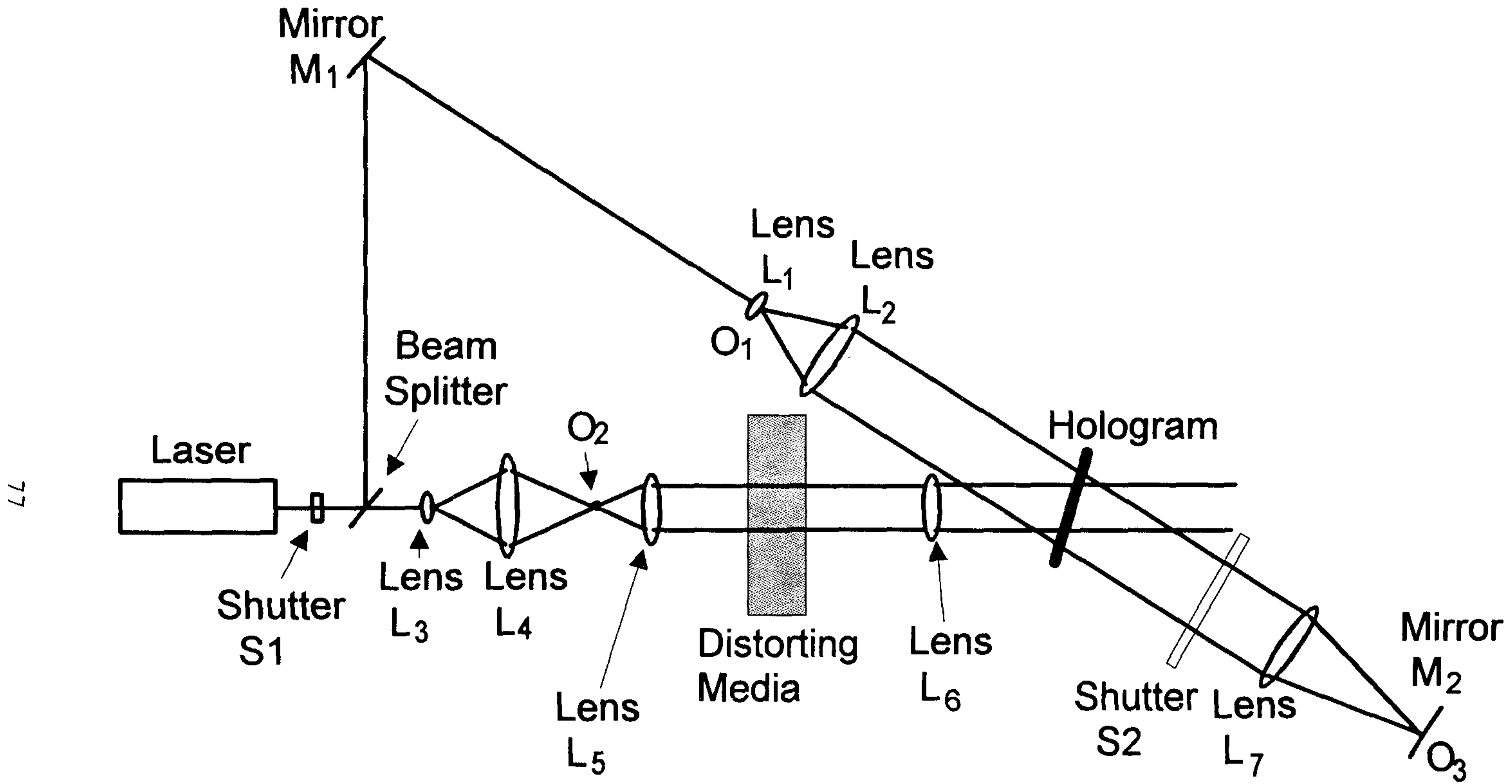


그림 41. 왜를 일으키는 매질을 통해 광정보를 전송하는 Interconnection의 예

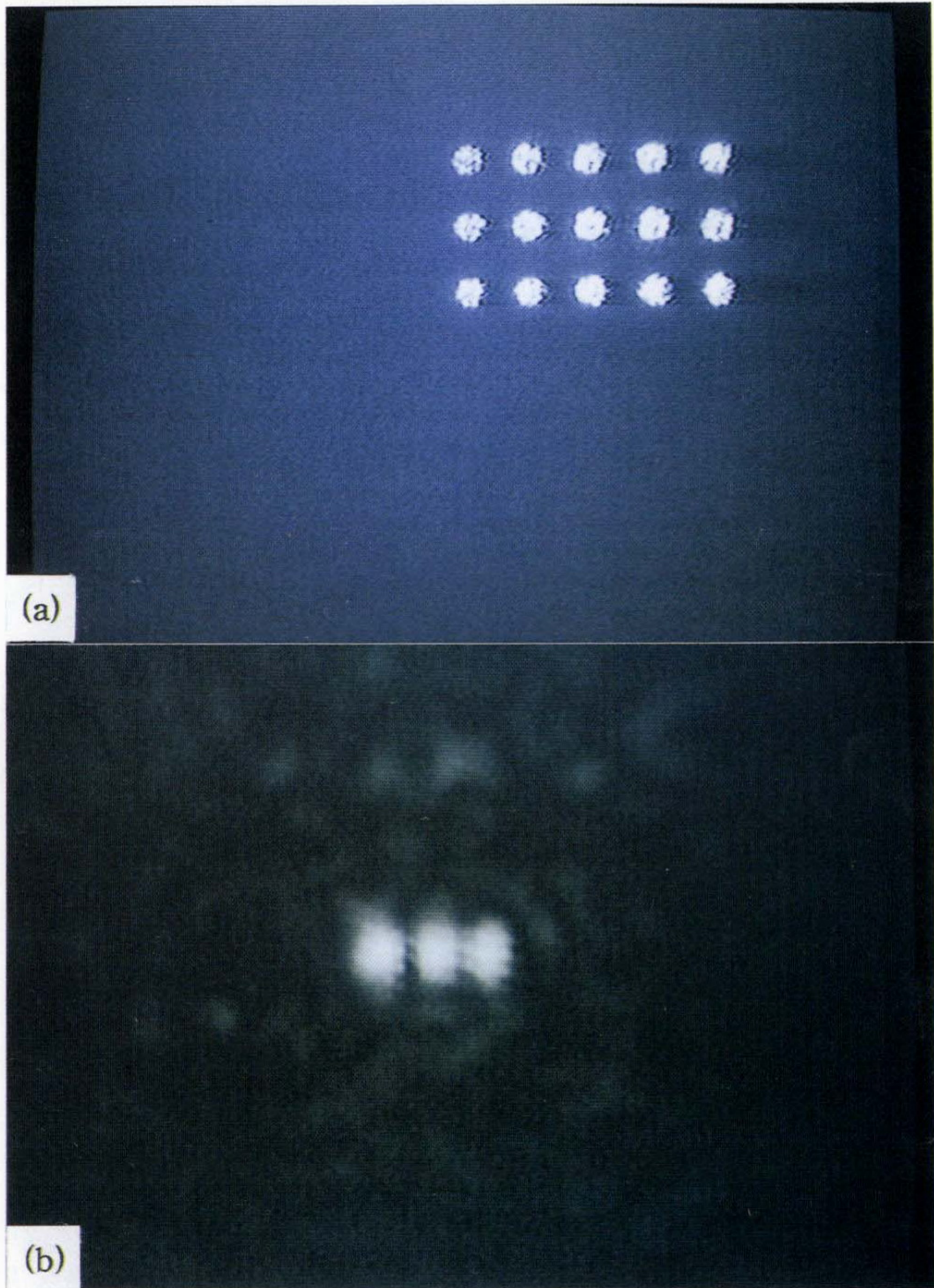
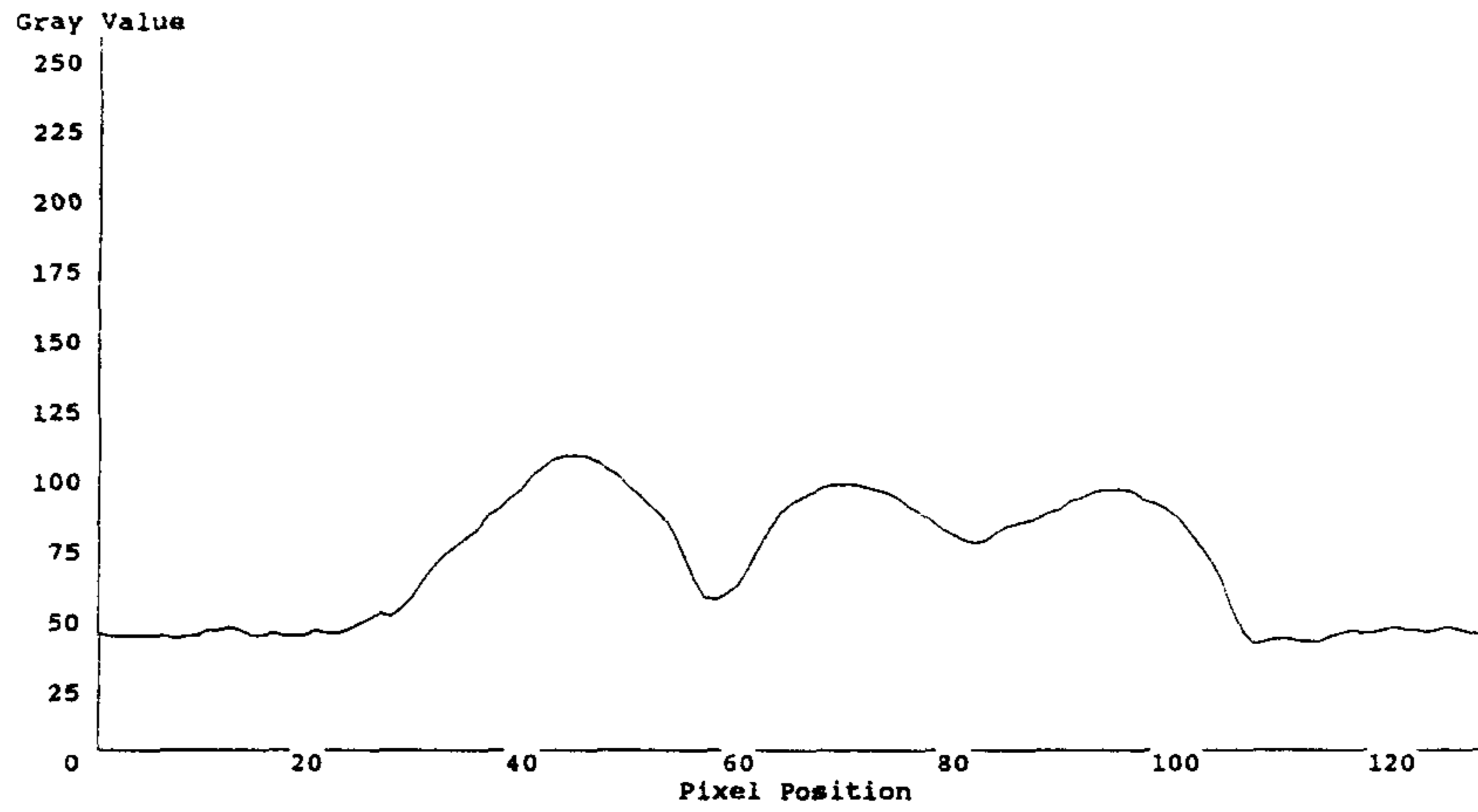
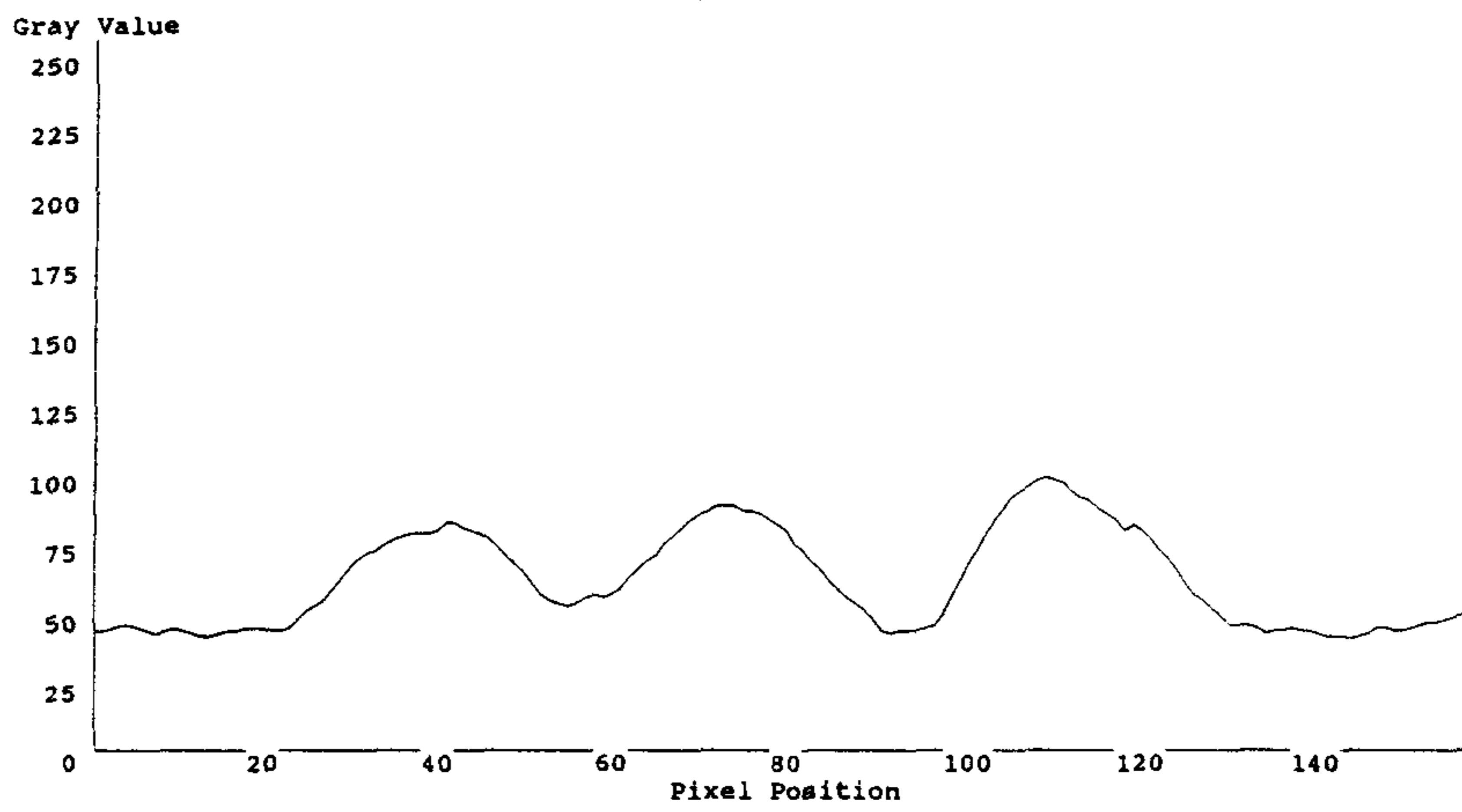


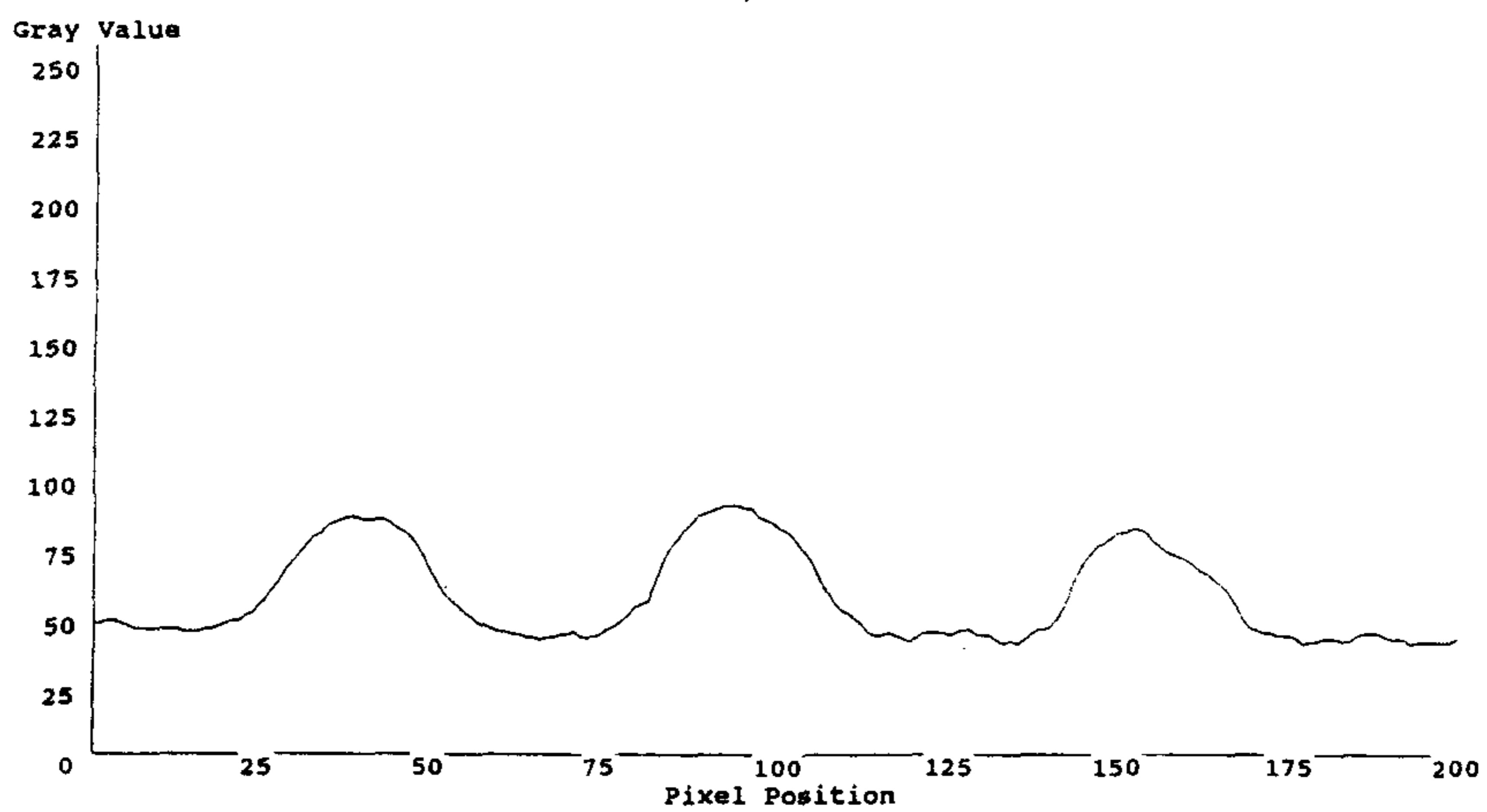
그림 42. (a) 그림 41의 실험을 위해 제작된 홀로그래피 소자의 재생상
(b) 이 실험의 전송의 결과 예



(a)



(b)



(c)

그림 43. 그림 41의 실험에 대한 전송가능한 간격을 알기 위한 Gray 레벨도

빔의 결합을 이용한 구성에 대해 연구를 하였다. 구성상의 차이점은 그림 44와 같이 filter의 구성시에 안정된 OPC가 결과에 영향을 미치므로 신호 빔을 두 빔 결합에 의해 입력시켰다. 해상도와 contrast는 큰 차이를 알 수가 없으나 제 1차년도와 비교하여 이 결과인 그림 46에서 filter되어 나타났다가 사라지는 시간이 반으로 짧아졌다. 그림 47은 그림 46의 결과에서 입력인 원형의 상을 순간적으로 나타나는 차를 gray 레벨로 기록한 것이다. 따라서 novelty filter의 구성은 OPC의 반응이 실시간으로 나타나는 경우에 좀 더 빨리 움직이는 상도 filter할 수 있다.

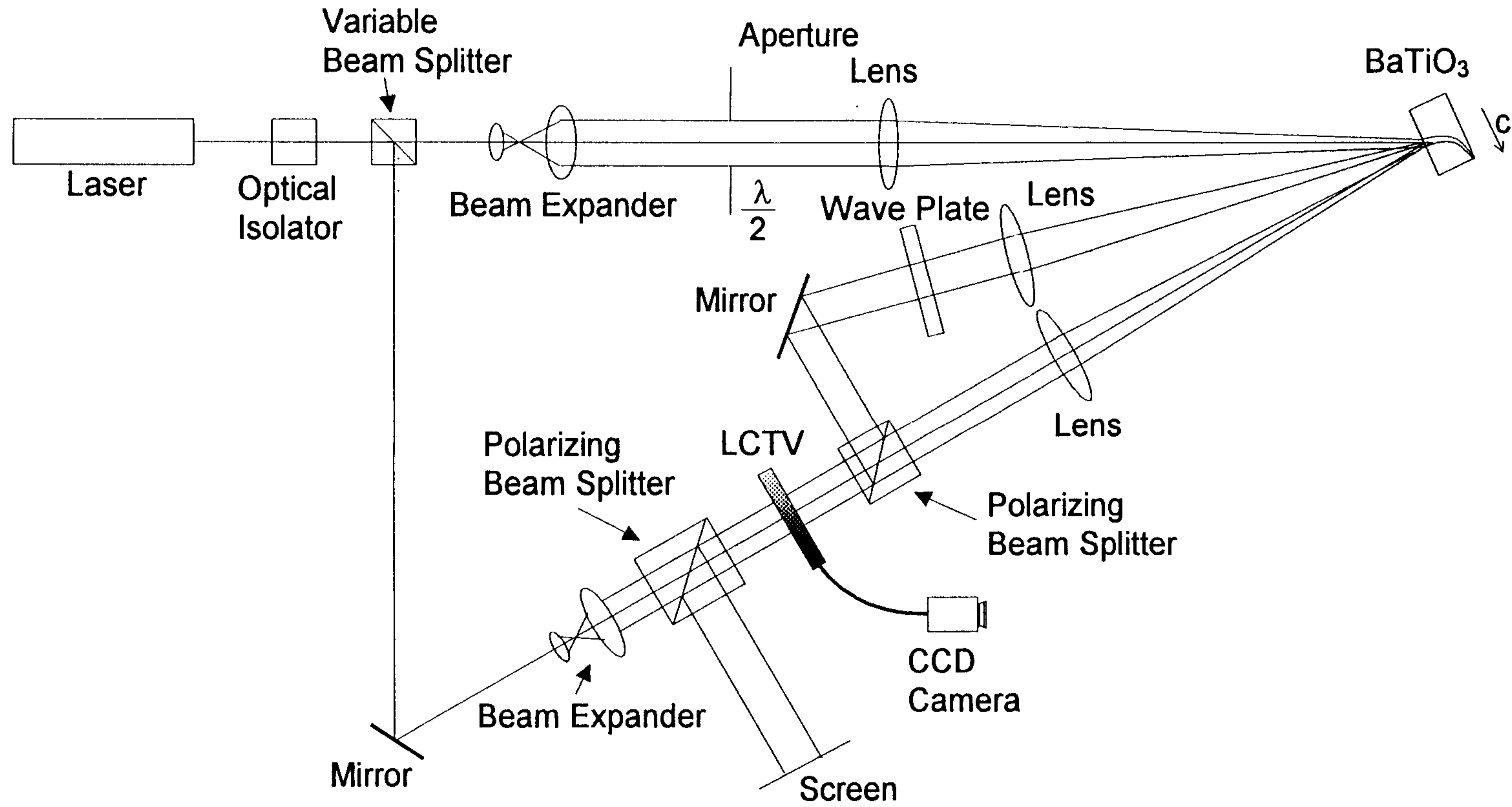


그림 44. 두 빔 결합에 의한 Novelty Filter 시스템

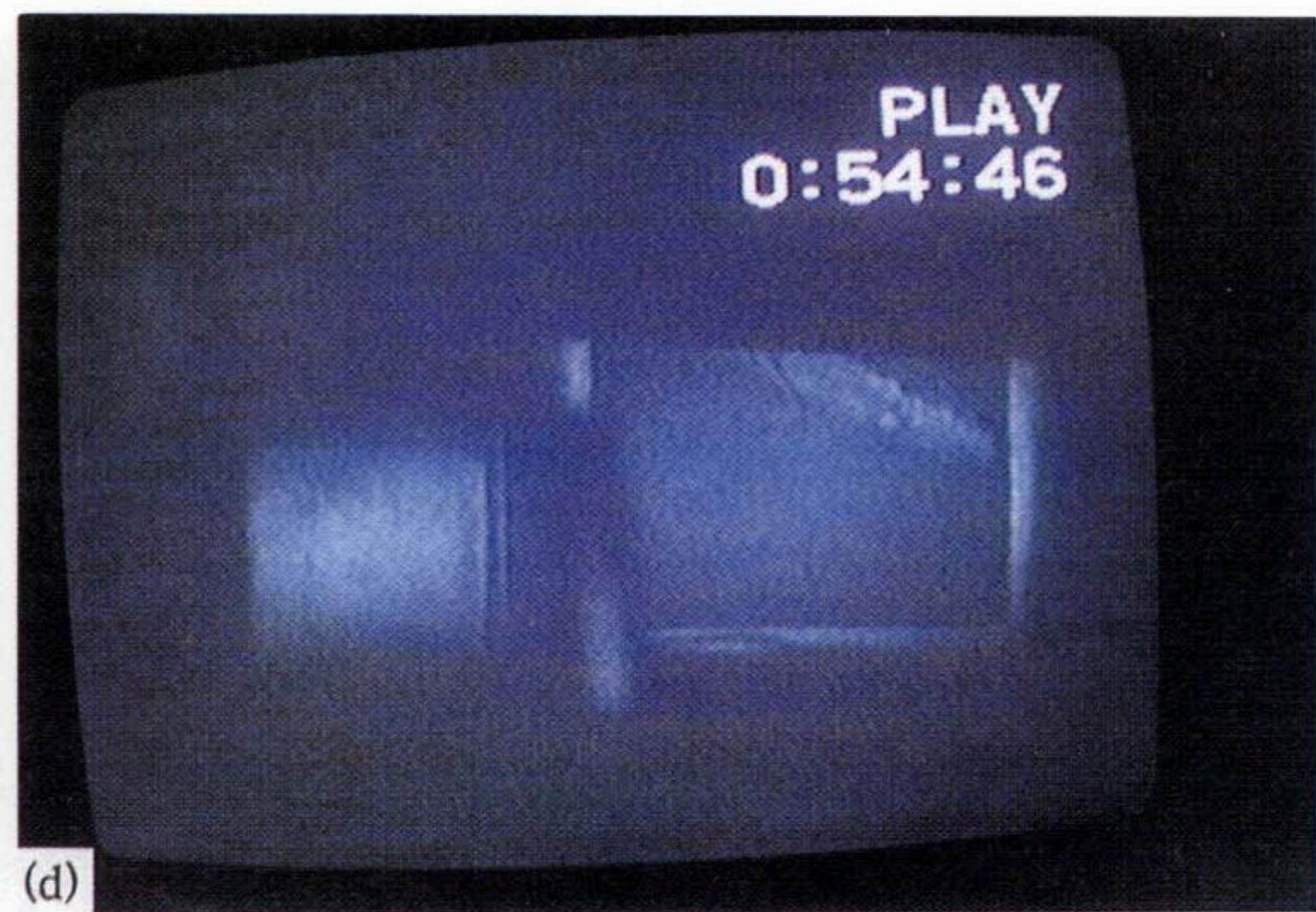
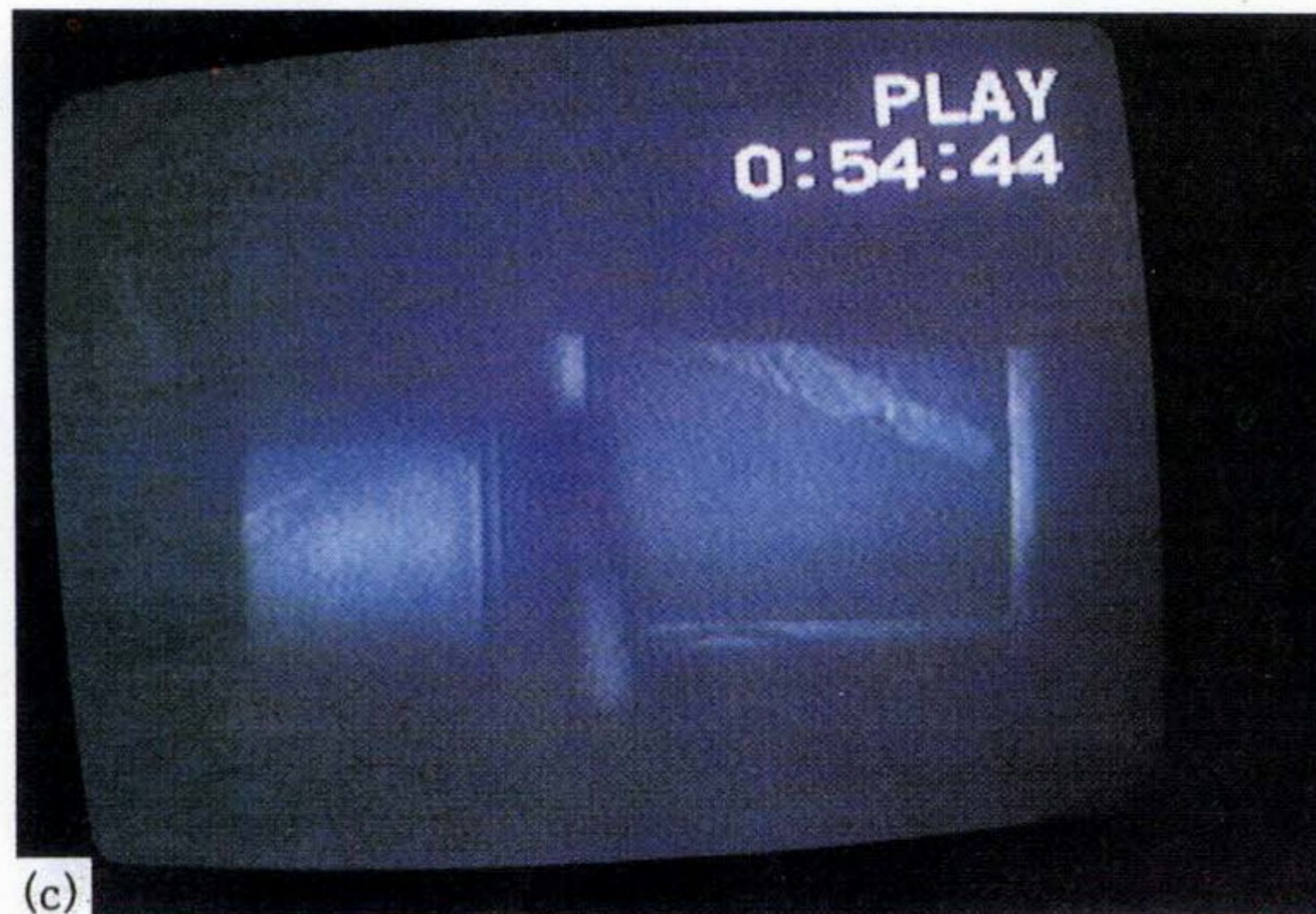
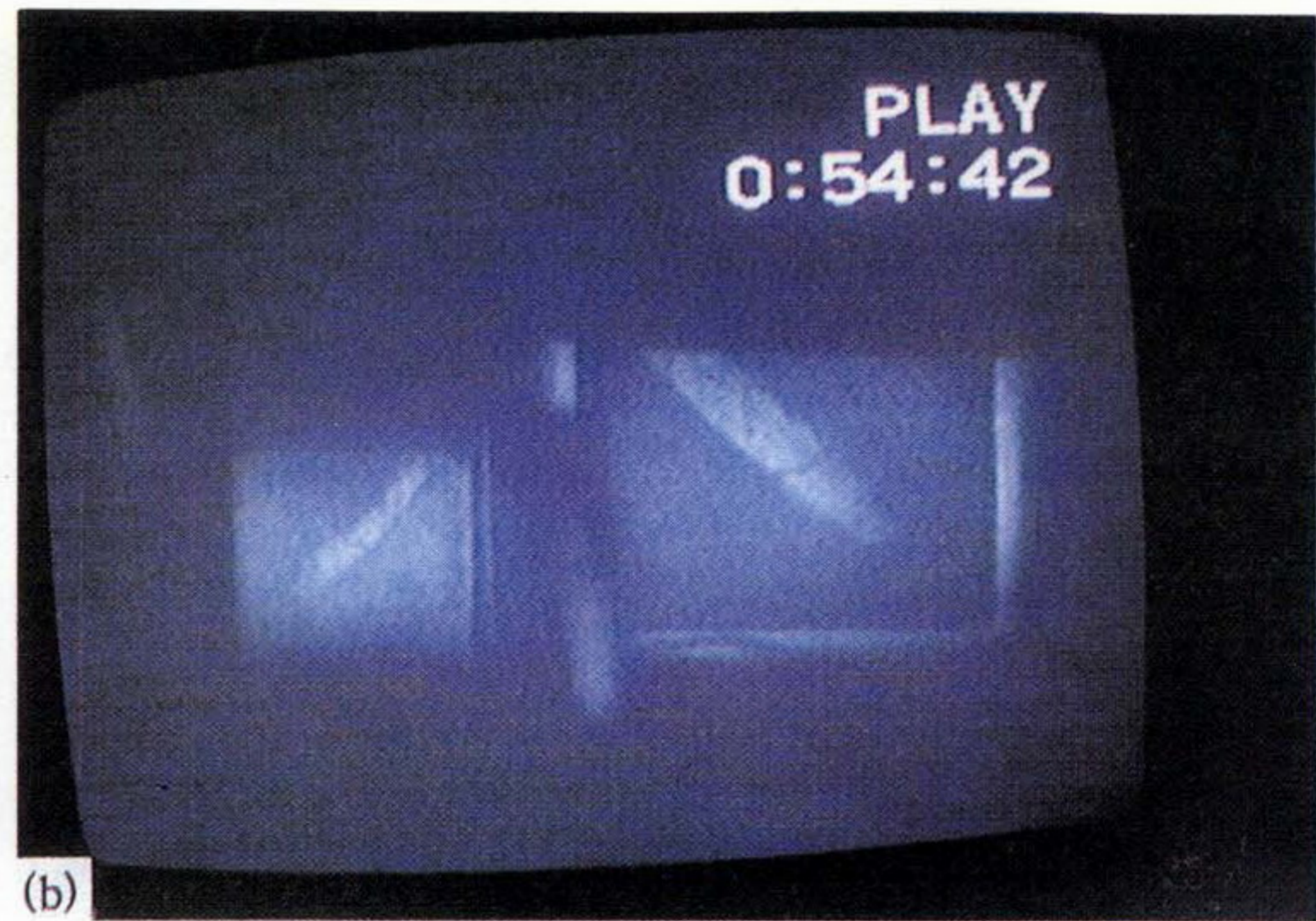


그림 45. SPPC에 의한 Novelty Filter의 결과

편광 위상공액 Novelty Filter에 의한 필터링 결과; 각 사진의 오른쪽이 입력이며 왼쪽은 필터링 결과임

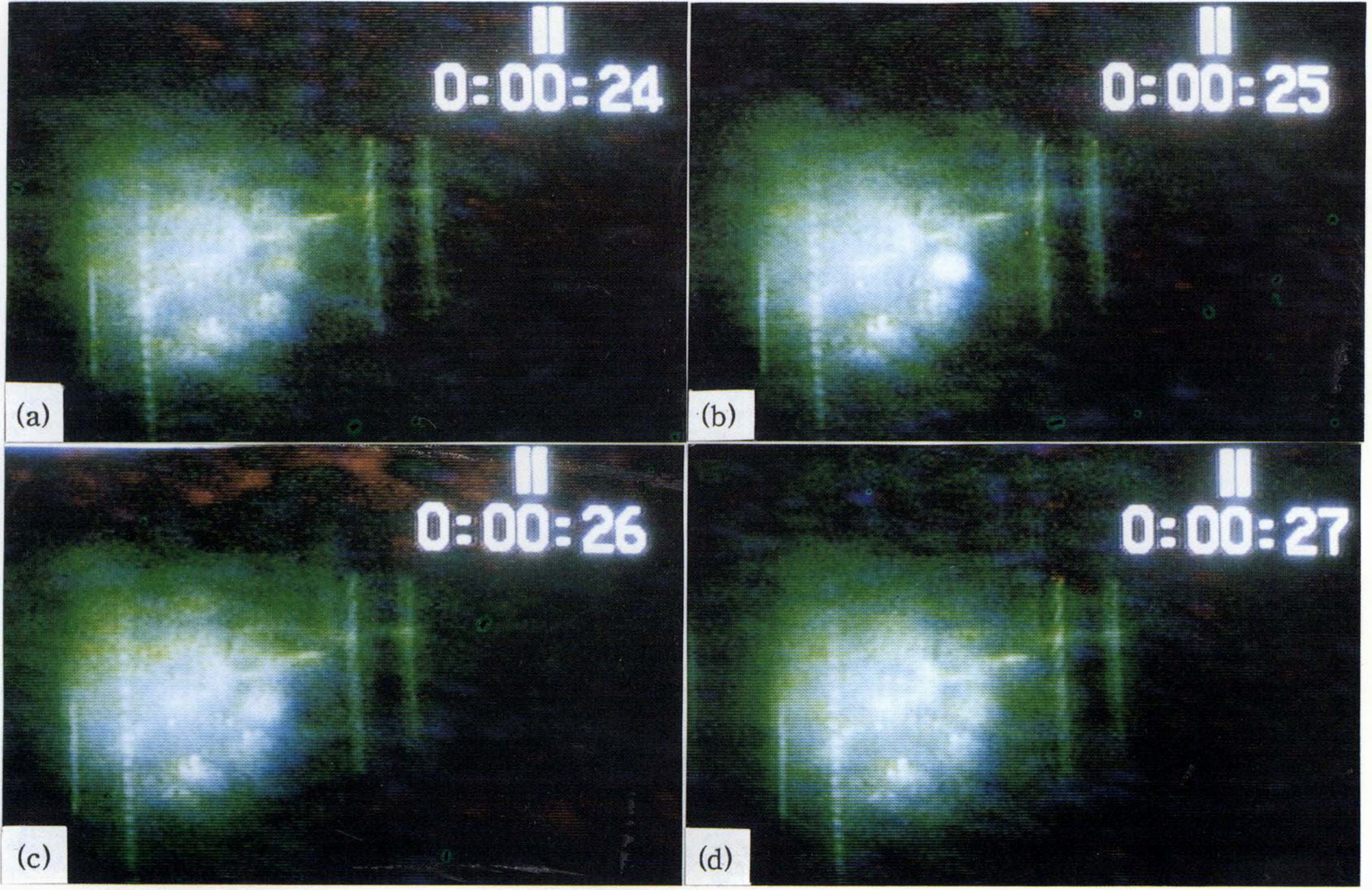
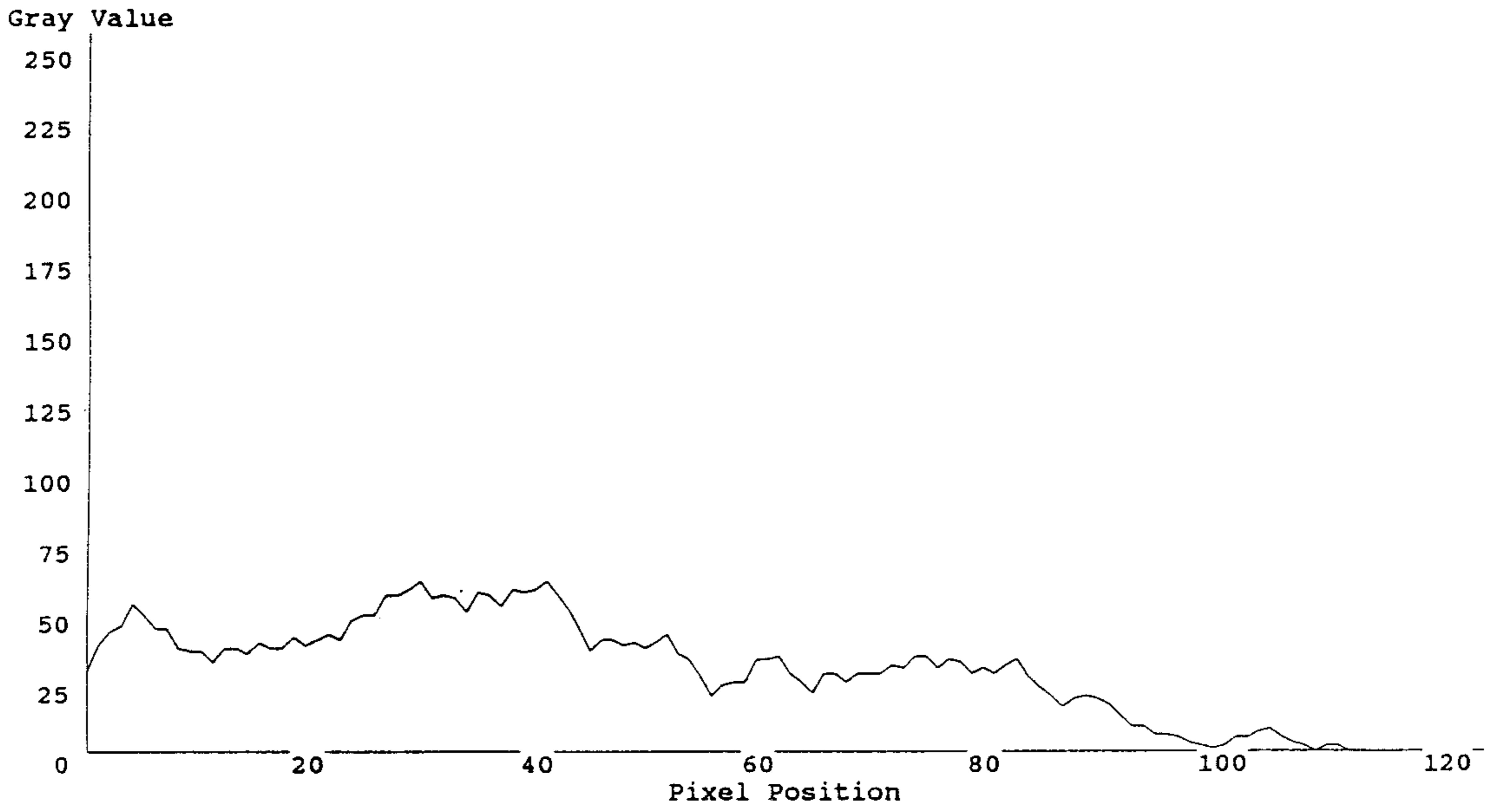
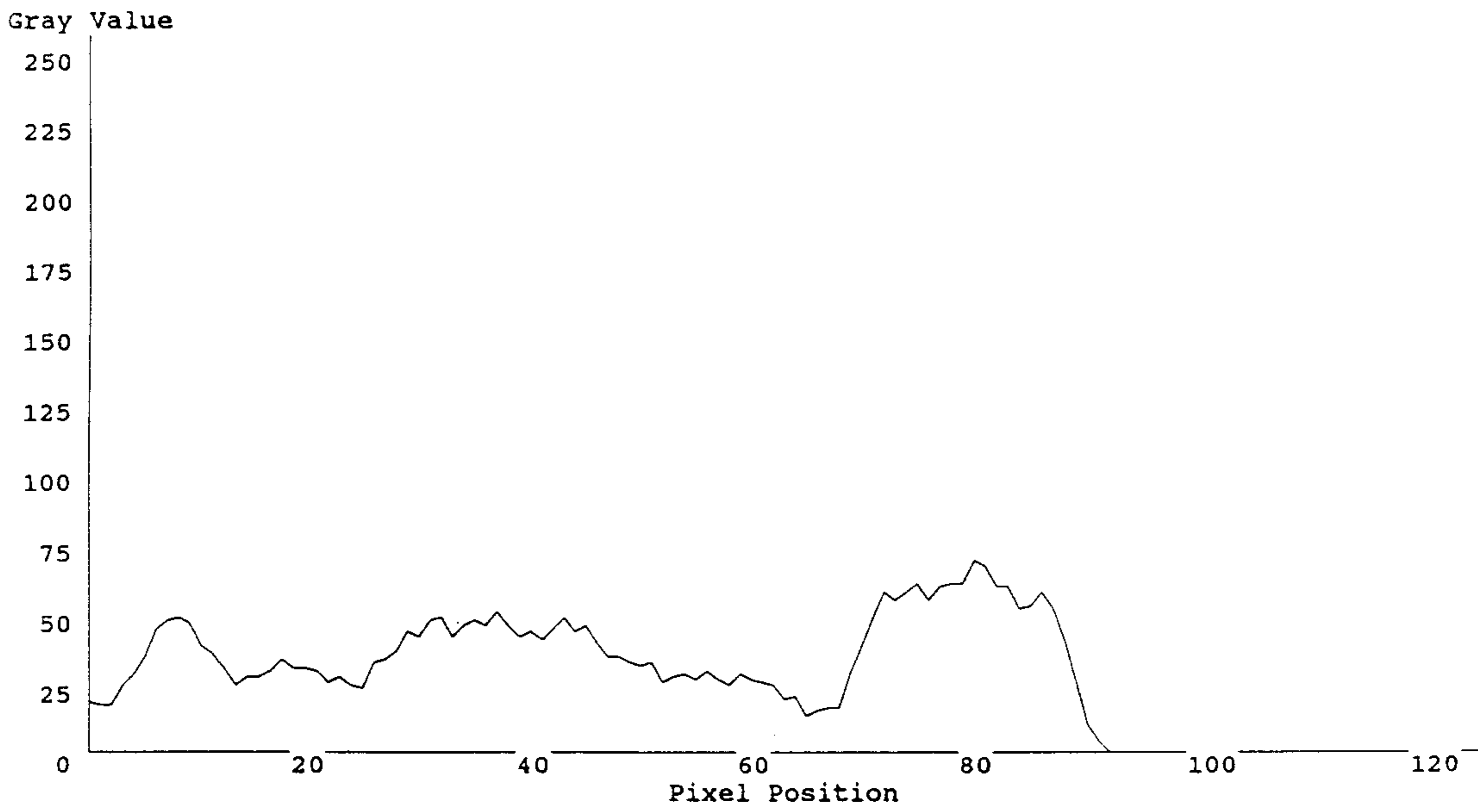


그림 46. 두 빔 결합에 의한 Novelty Filter 의 결과 예



(a)



(b)

그림 47. 두 빔 결합에 의한 Novelty Filter 의 결과 예를 Gray 레벨로 도시

제 4 장 결 론

광굴절성 결정인 BaTiO_3 를 이용하여 광정보 처리기술을 연구하였다. 먼저 광굴절성 결정의 OPC 특성에 대한 연구와 이의 응용에 대한 연구를 세부적으로 수행하였다. 두 빔으로 분할하여 기준파는 수렴되게 입사시켜 SPPC를 형성하게 하였고 입력상이 있는 광은 Fourier 렌즈를 사용하여 초점화시켜 입력하여서 빔의 waist가 결정내에 있는 기준파의 굴절을 격자 부분에다가 위치하게 하여서 OPC를 발생시키는, 두 빔 결합을 이용한 OPC가 SPPC에 비하여 여러 장점이 있음을 알고 이를 이용한 여러 응용을 연구하였다.

두 빔의 결합을 이용한 OPC는 일반적으로 SPPC에 의해 얻어지는 OPC상보다 깨끗한 OPC상과 전방향 및 수직방향으로 edge enhancement를 할 수 있으며 훨씬 적은 신호빔의 에너지 밀도에 대해서도 OPC가 발생이 되었다. 두 개의 거울 대신에 한개의 광굴절성 결정을 사용하여 Michelson 광위상공액 간섭계를 구성하는 것도 가능하였다. 이 간섭계로는 두 상의 가감산 및 광세기의 분포를 inversion시킬 수 있었다. 또한 광파이버를 통한 광정보 전송에서도 SPPC에 비하여 안정되고 해상도가 우수하였다.

두 빔의 결합에 의한 OPC의 기초 연구로 OPC의 기억 시간에 대해 연구하였다. 본 실험에서 사용된 결정의 경우 일반적으로 알려져 있는 것보다 긴 기억 시간을 나타냈다. OPC 이외에 결정의 내부 격자

에 의해 알려져 있는 것보다 많은 빔이 기억되어 나타났다. 입사빔의 반사빔의 위치에서 계속 기억된 빔이 나타나며 투과된 빔의 위치에서 역시 계속 기억된 빔이 나타났다. 이 현상은 결정 내부의 격자 형성과 OPC의 연구에 매우 중요한 단서가 되리라 여겨 지므로 지속적인 연구를 할 예정이다.

이런 광굴절성 결정의 광정보 처리 연구를 보다 효율적으로 수행하고자 홀로그래피 소자에 대해서 연구를 하였다. 광 정보처리에 사용될 필터나 기본적인 정보를 수록하기 위하여 홀로그래피 기억소자를 제작하였으며 1mm x 1.2mm 크기의 홀로그램을 2mm간격으로 기억시키는 것이 가능하였다. 홀로그래피 소자를 이용하여 광스위치용으로 사용할 수 있게 광 interconnection에 대해 연구하였다. 한개의 홀로그램에서 다중으로 빔을 분산하거나 원하는 위치에 미소 크기의 빔을 형성하는 것이 가능하나 현재로서는 수십 μm 가 한계이다. 또한 홀로그래피 소자를 이용하여 광굴절성 결정을 사용하는 행렬-행렬 연산보다 훨씬 정확하고 좀더 복잡한 연산도 가능함을 알았다. 이러한 홀로그래피 소자를 공간광변조소자와 같이 사용할 경우에 실시간 광정보 처리를 하는 것이 가능하리라 본다.

광연산 및 패턴인식에 응용하기 위한 Novelty Filter를 두 빔의 결합을 이용한 OPC로 구성하여 보았다. SPPC를 이용하여 구성된 Novelty Filter에 비하여 두배 정도로 반응시간이 빨라서 좀더 빨리 움직이는 상을 감지할 수 있었다. 이 연구결과들은 광정보 처리기술에 응용이 될 수 있으며 광산업 기술에 활용할 수 있는 기본적인 광기술로

도 기여할 수 있다.

참 고 문 헌

1. *Photorefractive Materials and Their Applications I and II*, edited by P.Gunter and J. -P Huignard (Springer-Verlag, Berlin, 1988).
2. K. R. MacDonald and J. Feinberg, *J. Opt. Soc. Am.* 73(5), 548(1983).
3. J. Feinberg, *J. Opt. Soc. Am.* 72(1), 46(1982).
4. G. Zhang, Qing-Xin Li, Ping-Pei Ho, S. Liu, Z. K. Wu and R. Alfano, *Appl. Opt.* 25(17), 2955(1986).
5. 손 정영 외 9인, “공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술개발”, 과기처 연구보고서, UCN736(7~9)-4150-4, 1991.
6. 손 정영 외 6인, “공간 광소자를 이용한 광컴퓨터 기술개발”, 과기처 연구보고서, UCN873-4672-4, 1992.
7. J. P Huignard and A. Marrakchi, *Opt. Lett.* 6(12), 622(1981).
8. Y. Shi, D. Psaltis, A. Marrakchi, and A. R. Tanguay, Jr., *Appl. Opt.* 22(23), 3665(1983).
9. L. J. Cheng, G Gheen, M. F. Rau, and F. C. Wang, *J. Appl. Phys.* 62(9), 3991(1987).
10. H. K. Liu and L. J. Cheng, *Appl. Opt.* 27(5), 1006(1988).
11. I. McMichael, M. Khoshnevisan, and P. H. Beekwith, *Conf. on Lasers and Electro-Optics Tech. Digest Series by OSA*, vol. 7, 218(1988).

12. M. Cronin-Golomb et al., Conf. on Lasers and Electro-Optics Tech. Digest Series by OSA, vol. 14, 194(1987).
13. J. Feinberg, Opt. Lett. 5, 330(1980).
14. P. Yeh, A. E. Chiou, J. Hong, P. Beckwith, T. Chang, and M. Khoshnevisan, Optical Eng. 28(4), 328(1989).
15. A. Yariv, Appl Phys. Lett. 28(2), pp. 88-89 (1976); J. Opt. Soc. Am. 66(4), 301-306 (1976).
16. A. Gover, C. P. Lee, and A. Yariv, J. Opt. Soc. Am. 66(4), 306-311 (1976).
17. B. Fischer and D. Peri, Opt. Lett. 10(4), 182-183 (1985).
18. B. Fischer and S. Sternklar, Appl. Phys. Lett. 46(2), 113-114 (1985).
19. P. H. Beckwith, I. McMichael, and P. Yeh, Opt. Lett. 12(7), 510-512 (1987).
20. A. Yariv, Y. Tomita, and Kazuo Kyuma, Opt. Lett. 11(12), 809-811 (1986).
21. Y. Tomita, R. Yahalom, and A. Yariv, Opt. Lett. 12(12), 1017-1019 (1987).
22. Y. Tomita, K. Kyuma, R. Yahalom, and A. Yariv, Opt. Lett. 12(12), 1020-1022 (1987).
23. G. J. Dunning and R. C. Lind, Opt. Lett. 7(11), 558-560(1982).
24. Y. Tomita, R. Yahalom, K. Kyuma, A. Yariv, and N.

- Sze-Keung Kwong, *IEEE J. Quant. Electron.* 25(3), 315-338 (1989).
25. E. G. Paek, C. E. Zah, K. W. Cheung, and L. Curtis, *Opt. Lett.* 17(8), 613-615(1992).
26. A. M. Tai, *Appl. Opt.* 22, 3826-3832(1983).
27. 藤井陽一, 西澤紘一, 先端光技術, アク“ネ承風社: 東京 (1988).
28. J. Feinberg, *Opt. Lett.* 7(10), 486-488 (1982).
29. K. R. MacDonald and J. Feinberg, *J. Opt. Soc. Am.* 73(5), 548-553 (1983).
30. J. O. White, M. Cronin-Golomb, B. Fischer, and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.* 40(6), 450-452 (1982).
31. D. Z. Anderson and J. Feinberg, *IEEE J. Quantum Electron.* 25(3), 635(1989).