

# Epitaxial에 의한 Si epi층의 캐리어 壽命과 P-N접합의 異常導電現象

論	文
26~5~3	

## Carrier Lifetime and Abnormal Conduction Phenomena in Silicon Epitaxial Layer-Substrate Junction

威英權\* · 閔南基\*\* · 金承培\*\*\*  
(Yung Kwon Sung, Nam Ki Min, Seung Bae Kim)

### Abstract

This paper described the minority carrier lifetime in Si epitaxial layer, and also the voltage (V) versus current (I) characteristics of high resistivity Si epitaxial layer-substrate junction.

The measured lifetime in Si epi-layer was much shorter than in bulk, and the temperature dependence of lifetime was found to agree well with Shockley-Read model of recombination which applies to high resistivity n-type materials.

The V-I curve showed: an ohmic region ( $I \propto V$ ), a sublinear region ( $I \propto V^{1/2}$ ), a space charge limited current region ( $I \propto V^2$ ), and finally a negative resistance region.

We investigated these phenomena by the theory of the relaxation semiconductor.

### 1. 序 論

1961년 Bell연구소의 Theuerer<sup>1)</sup> 등이 메사트랜지스터의 특성을 향상시키기 위하여 epitaxial 성장법을 응용한 이래 epitaxial 공정은 오늘날 트랜지스터의 공업뿐만 아니라 반도체공업 전반에 걸쳐 널리 이용되어 전자공업에서 가장 중요한 공적으로 군림하고 있다.

한편 이에 수반하여 epitaxial 법에 의한 성장결정에 관하여 결정학적으로 이론적으로나 실험적으로 거의 추구되어 체계가 확립되어 왔다.

그러나 그 전기적인 특징, 특히 epi층을 이용한 P-n 접합의 특성 및 epi층의 고전계 도전현상 등에 대한 물성론적 연구는 거의 없는 상태이다.

더구나 요즘 각종 전자기기 및 장치가 초소형화 및 대용량화를 지표로 삼고있는 추세에 비추어 epi층이 기판과 이루는 p-n 접합의 전기적 특성 및 고전계 도전기구의 규명은 대단히 의의있는 연구과제일 것이다.

이러한 관점에서 우리들은 epi층의 전기적 특성을 고찰하고자 epitaxial 성장법에 의해 제작한 epi층 및 p-n 접합에 대해 아래 항목에 따라 실험적으로 추구하고, 적절한 물성론적 해석을 가하였다.

(1) epi층에 있어서 소수캐리어의 수명 측정 및 이에 수반하는 요인 검토.

(2) epi층과 기판이 이루는 p-n 접합의 V-I 특성의 異常現象 고찰 및 응용면의 추구.

### 2. 試料 및 實驗方法

#### 2.1 試料의 製作 및 電極附着

실험에 사용한 시료는 P형 Si기판위에 epi층을 널리 알려진 수소환원법에 의하여 성장시켰으며 성장시킨 epi층의 두께는 편광현미경, angle lapping법<sup>2)</sup>에 의해 또 比抵抗은 4탐침법(four probe method)에 의해 각각 측정하였다.

전극 및 보호전극(guard ring)은 진공증착장치를 이용하여 순도 99.99%의 Al을 진공증착시킨 후 550°C에서 합금화 시켰다. 보호전극은 V-I 특성 측정시 표면을 통해 흐르는 누설전류의 영향을 제거하기 위하여 설치하였다.

또한 부착시킨 전극에 대한 ohmic contact의 與否는 시료에 일정한 전류를 극성을 바꾸어 흘려 극성에 따라 시료에 걸리는 전압의 차가 거의 없는 것으로써 확인하였다.

#### 2.2 表面處理

표면위의 결함이나 먼지, 습기, 기름 등과 같은 오염을 최소화시키기 위하여 본 실험에서는 Trichloroethylene(C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>)→acetone→d.i. water 순으로 세척한 후 silica gel을 통한 공기로 건조하였다.

#### 2.3 試料의 規格

위와같은 과정을 거쳐 준비된 시료의 규격은 다음과

\* 正會員 : 高大理工大 教授 · 工博(當學會 理事)

\*\* " : 高大大學院 電氣工學科

\*\*\* " : " " "

接受日字 : 1977年 7月 13日

같다.

基板 : P형 Si wafer, 比抵抗 40[Ω-cm], cutting plane <100>, 두께 0.2[mm]

epi 층 : 정상적인 epi, 兩面 epi, misfit(약 5°)등 3가지로 성장시켰다. 각각의 epi층 두께 약 10, 20[μm], 비저항 2×10<sup>5</sup>[Ω-cm]

2.4 測定裝置 및 方法

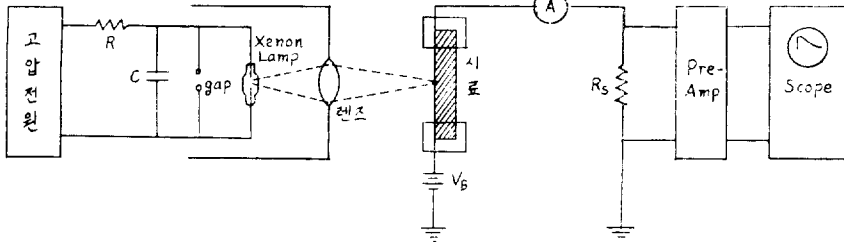


그림 1. 소수캐리어 수명 측정장치 구성도

Fig. 1. Block diagram of the apparatus used to measure the minority carrier lifetime.

이 光펄스를 차폐함내에 있는 시료표면 위의 한점에 렌즈를 통해 집광시켜서 펄스적으로 소수캐리어의 발생과 더불어 그 감쇄곡선으로부터 소수캐리어의 수명을 측정하였다.

즉 光펄스 조사에 의한 전도도의 변화를 저항 R<sub>s</sub> 양단에 걸리는 전압으로 synchroscope에 투영시켜 이로부터 수명을 결정하였다.

그런데 캐리어의 소멸이 재결합과 확산만으로 이루어지기 위해서는 바이어스 전압이 될 수 있는 한 적은 것이 바람직하다. 따라서 본 실험에서 수명측정을 위한 인가전계 상한치는 J.G. Kreer<sup>5)</sup>에 의한 식

$$E \leq \frac{300}{\sqrt{\tau\mu}} \text{ [v/cm]} \quad (1)$$

단, 수명 τ는 [μsec]로 표시되며

$$\mu = \frac{\mu_n \mu_p |n_0 - p_0|}{n_0 \mu_n + p_0 \mu_p} \text{ [cm/volt-sec]}$$

n<sub>0</sub>, p<sub>0</sub>는 전자, 정공의 농도, μ<sub>n</sub>, μ<sub>p</sub>는 각각 n<sub>0</sub> ≫ p<sub>0</sub>, p<sub>0</sub> ≫ n<sub>0</sub>인 경우의 이동도이다.

으로 정하되 검출저항 R, 및 바이어스 전압 V<sub>B</sub>를 가

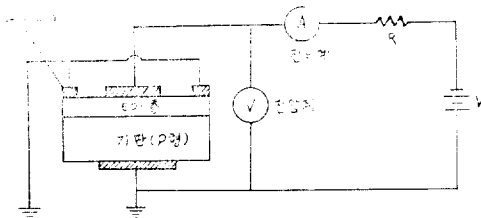


그림 2. P-N접합의 V-I특성 측정회로

Fig. 2. Measuring circuit for V-I characteristics of P-N junction.

2.4.1 少數캐리어의 壽命 測定裝置

소수캐리어의 수명은 光傳導度減衰法(photoconductive decay method)으로 측정하였다.

그림 1은 측정장치의 구성도이다 콘덴서 C는 고압전원으로부터 저항 R을 통하여 충전시킨 후 방전 gap을 통해 Xenon flash tube를 방전시켜서 펄스폭이 약 0.01 [μsec]인 光펄스를 얻었다.

변시켜 시료에 따라 적절한 V<sub>B</sub>를 선택토록 하였다.

2.4.2 p-n접합의 V-I특성 測定回路

그림 2는 epi층이 기판과 이루는 p-n접합의 V-I특성 측정회로이다.

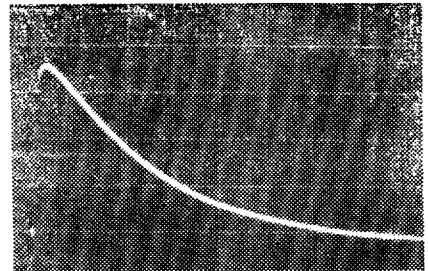
V는 고입력 임피던스의 전압계이고 A는 전류계, B는 전원이다.

3. 實驗結果 및 考察

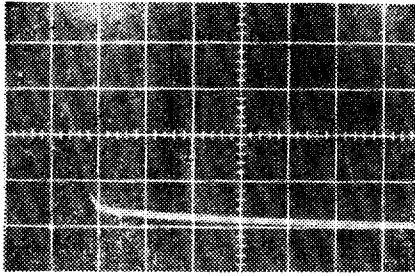
3.1 epi층의 少數캐리어 壽命特性

그림 3(a)(b)는 기판 및 epi층에서의 대표적인 측정파형을 나타낸 것이다.

epi층 (b)의 경우 그림에서 보는 바와같이 파형의 초기부분이 대단히 급격한 감쇄특성을 나타내고 있는데 이것은 epi층의 두께가 너무 얇아서 생성된 과잉캐리어가 兩電極으로 확산된 가는 것보다 표면으로의 확산이 더 빨리 일어나 표면재결합에 의해 소실되는 것으로 보여진다<sup>5)6)</sup>.



(a) 기판  
(a) substrate



(b) epi층  
(b) epi-layer

그림 3. 광전도의 감쇄  
Fig. 3. Photoconductive decay signal

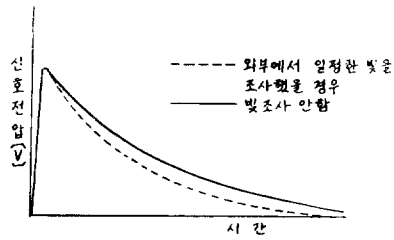


그림 4. 외부에서 일정한 빛을 조사했을 경우 파형의 변화  
Fig. 4. The photoconductive signal with the crystal illuminated with a lamp.

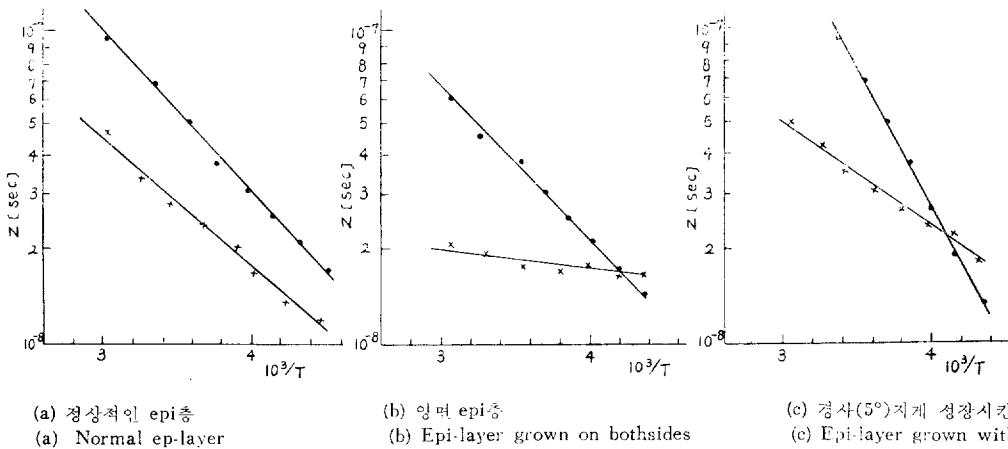


그림 6. 수명의 온도의존성  
Fig. 6. Temperature dependence of lifetime.

그 결과 그림 4에 나타난 바와같이 파형변화가 관측되었으며 온도의존성을 나타낸 그림 5를 보더라도 trap의 영향이 어느정도 관여하고 있음을 알 수있다.

따라서 trapping에 크게 관여하는 수명의 온도의존성을 실측하였던 바 그림 6 (a)(b)(c)와 같이 온도가 증가함에 따라 수명도 증가하나 (b)(c)의 경우에는 두께

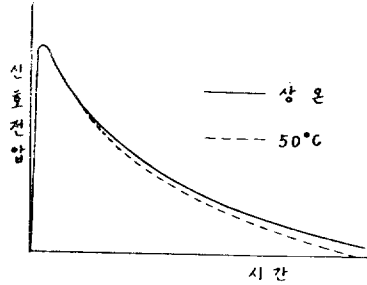


그림 5. Trapping의 증거  
Fig. 5. Evidence of trapping.

Bulk의 경우 수명을 결정하는데 있어서 초기의 급격한 감쇄부분을 무시하고 결정하는 것이 실제적인 수명이라고 하지만<sup>2)</sup> 본 실험에서는 epi층의 두께로 보아 표면의 영향이 상당히 크다고 생각되므로 표면제결함은 무시할 수 없으며 그림 6에서와 같이 epi층의 두께가 감소하면 대체로 수명도 짧아지는 것 같다.

한편 Si에서는 금지대의 폭(약 1.2eV)이 크고, 따라서 trap준위도 깊기 때문에 Ge와는 달리 상온에서 이미 trapping현상이 쉽게 나타나 이로인해 실측한 수명이 실제보다 크게 되므로 수명측정시 외부에서 일정한 빛(100W 전구사용)을 비추어 주어 모든 trap준위를 충전시켜 여러 trap의 영향을 제거함으로써 진정한 수명을 측정하도록 하였다.

의 변화에 따라 약간씩 변화하되 그 변화가 (a)에 비해 정상적으로 변화하는 것이 아니라 기이하게 변화하여 현 실험단계에서는 무슨 因子에 좌우되는 것인지 잘 모르겠다.

그래서 정상적인 epi층인 (a)에만 국한시켜 수명의 온도의존성을 고찰해 본다면  $\log \tau - 1/T$ 의 관계는

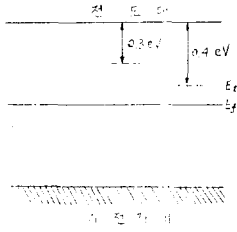


그림 7. epi층의 에너지 준위도.

Fig. 7. Energy level diagram for the epi-layer.

single trap level을 가정한 Shockley-Read<sup>9)</sup>의 재결합에 관한 이론식 중에서 고저항의 n형 반도체에 대한 근사식  $\tau = \tau_0 \exp(E_t - E_f/kT)$ 와 잘 일치하였다. 잊식에서  $E_t$ 는 trap의 깊이,  $E_f$ 는 페르미준위,  $k$ 는 볼츠만상수이다.

그림으로부터 계산한 결과  $E_t - E_f \approx 0.3 \sim 0.4$  [eV] 정도로 본 실험에서 사용한 epi층의 에너지준위도는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

물론 bulk에 적용되는 model을 바로 epi층에 적용시키는 것은 異論의 여지가 있을 것이나 요는 성장시킨 epi층에서의 trap의 영향에 있어서 single level

center가 지배적임을 시사하는 것 같다.

이상의 실측으로부터 수명에 관련된 因子에 대한 계산치를 총괄하면 다음과 같다.

(1) 擴散係數

앞에서 검토한 바와같이 epi층의 두께로 보아 epi층의 표면에서의 표면재결합속도가 대단히 크다고 생각된다.

이와같은 경우 단면적  $2A \times 2B$ 인 n형시료에 대한 표면재결합수명은<sup>10)</sup>

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{\pi^2 D_p}{4} \left( \frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} \right)$$

단,  $D_p$ 는 정공의 확산계수로 주어진다.

그런데 본 시료는  $A \gg B$ 이므로  $A^2/1$ 항을 무시하면 정공의 확산계수  $D_p$ 는

$$D_p = \frac{4B^2}{\pi^2 \tau_s} = \frac{4(20 \times 10^{-4} \text{cm})^2}{\pi^2 (8 \times 10^{-8}) \text{sec}} = 20.28 [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

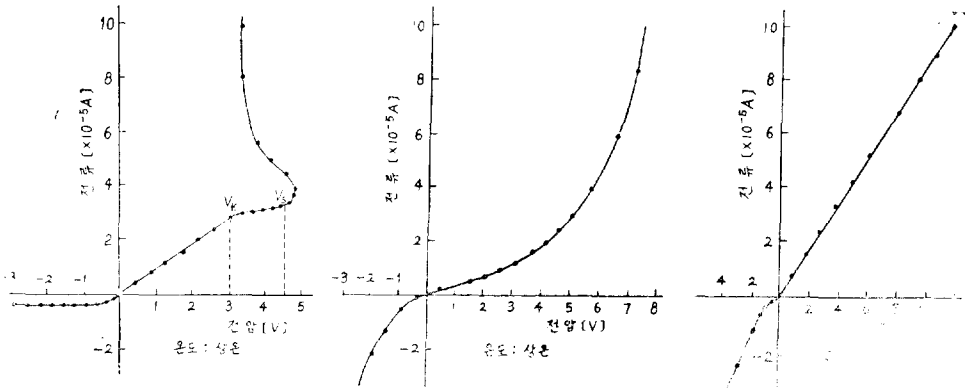
로 된다.

(2) 移動度

정공의 이동도는 Einstein 관계식으로부터

$$\mu_p = \left( \frac{q}{kT} \right) D_p = \frac{20.28}{0.026} = 0.78 \times 10^8 [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

이다.



(a) 정상적인 epi층  
(a) Normal epi-layer

(b) 양면 epi층  
(b) Epi-layer grown on both sides

(c) 경사(5°)저배 성장시킨 epi층  
(c) Epi-layer grown with 5°

그림 8. V-I 특성 곡선  
Fig. 8. V-I characteristics of p-n junction.

3.2 p-n接合의 V-I特性

다음에 上述한 高抵抗 Si epi층과 기판이 이루는 p-n 접합에 대한 V-I특성을 실측하였던 바 그림 8(a)(b)(c)처럼 나타났다. (a)는 정상적인 epi층의 경우이고, (b)는 兩面 epi, (c)는 misfit(5°)시킨 경우의 특성이나 (b)(c)에 관한 것은 수명측정시와 마찬가지로 結晶性의 의문을 비롯하여 정성적인 실험부족으로 현 단계에서는 무엇이래 해석할 수 없다. 따라서 정상적인 epi층

이 이루는 p-n접합의 특성에만 국한시켜 고찰하였다.

그림 (a)에서 보는 바와같이 일반적인 p-n접합의 V-I특성과는 달리 처음에는 바이어스 전압이 증가함에 따라 전류가 직선적으로 증가하는 ohmic 영역이있고 다음에 전류가  $I \propto V^{1/2}$ 의 관계에 따라 흐르는 sublinear한 영역을 거쳐  $I \propto V^2$ 인 영역이 나타나고 마지막으로 부정저항영역이 존재한다.

특히  $I \propto V^2$ 인 영역은 p-n접합표면현상에서의 열화와

관련해서 문제시 되는 소위 channel effect에 의한 것 인지 알 수 없다. 실제로 bulk인 경우에는 n-p-n구조 일때 p형의 internal surface에 n형의 반전층이 형성되어 양쪽의 n형에 by pass가 생겨 표면의 누설전류가 문제시 되나 본 실험에서는 나중에 부성저항영역이 나타나는 것으로 보아 channel effect는 생각할 수 없다.

따라서 위와같은 V-I특성 전체에 대한 해석은 고저항 Si epi층이 유전완화시간(dielectric relaxation time)이 확산거리수명보다 더 큰 소위 relaxation case<sup>11)</sup>반도체를 이루기 때문이라고 생각된다.

즉 유전완화시간  $\tau_d$ 는

$$\tau_d = \epsilon \rho \quad (3)$$

단  $\epsilon$ : 유전율,  $\rho$ : 비저항

이므로 epi층에 대한  $\epsilon, \rho$ 값을 대입하여 계산하면  $\tau_d \approx 10^{-12} \times 2 \times 10^5 \approx 2 \times 10^{-7}$  [sec]로 앞에서 측정된 소수캐리어의 수명  $\tau \approx 10^{-8}$  [sec]와 비교하여  $\tau_d > \tau$ 인 조건이 만족되므로 epi층과 기판이 이루는 p-n접합의 기이한 V-I곡선은 relaxation case반도체에 의한 p-n접합의 효과로 볼 수 있으며 따라서 relaxation case의 개념을 도입하여 고찰하는 것은 타당하다고 생각된다.

그림 (8)에서 낮은 바이어스인 경우는 전체의 전류가 공간전하영역을 흐르는 전류에 의해 정해지며  $I \propto V$ 인 관계가 성립한다.

이때 공간전하영역의 비저항은 거의 최대치<sup>11)</sup>

$$\rho_{\max} = \frac{1}{2q(\mu_n \mu_p)^{1/2} n_i} \quad (4)$$

단  $q$ : 전하량

$n_i$ : 진성반도체의 캐리어 농도

$\mu_n, \mu_p$ : 각각 전자 및 정공의 이동도

를 취하게 되며 따라서 이 영역에서의 저항  $R_1$ 은 ohm의 범칙으로부터 대체로  $R_1 \approx 1.2 \times 10^8$  [ $\Omega$ ] 정도이다.

또한 이 영역에서는 전자와 정공은 공간전하영역으로 소인되어 relaxation case의 특징인

$$np = n_i^2$$

조건이 만족되게끔 빠른 재결합이 일어난다.

이와같은 ohmic영역 ( $I \propto V$ )은 정공이 공간전하영역을 넘어서 n영역에 주입되는 전압  $V_A$ 까지 계속된다.

여기서  $V_A$ 는 약 3[V] 정도이다.

바이어스가  $V_A$  이상이 되면 공간전하영역으로부터 주입된 정공이 다수캐리어인 전자의 공핍을 유도하여 마치 공간전하영역이 넓어지는 듯한 상황이 되고 이 때 전류 및 저항의 증가는 공간전하영역의 폭에 비례하게 되어 결국 전류는  $I \propto V^{1.2}$ 의 관계에 따라 흐르게 된다. p-n접합의 순방향에도 불구하고 이와같이 수 V까지는 ohmic으로 되고 그 이상에서는 sublinear영역이 나타

나는 것은 보통의 lifetime case에서의 전류가 전압에 따라 지수함수적으로 증가하는 것과는 아주 대조적인 현상으로 이것이 relaxation case반도체의 큰 특징<sup>12)</sup>이다.

$I \propto V^{1.2}$ 인 관계는 영역 전체가 공간전하영역으로 되어버리는 바이어스  $V_A$ 까지 계속되나 그 이상의 전압에서는 전류는 공간전하제한전류<sup>13)14)</sup>에 의해 지배되어  $I \propto V^2$ 인 관계에 따른다.

그리고 더욱 전압을 증가시키면 double injection<sup>15)</sup>에 기인하는 듯한 부성저항영역이 나타난다.

W.H. Weber<sup>16)</sup> 등에 의하면 Si p-i-n 구조의 반도체에서 double injection의 경우 부성저항영역이 나타나기 전에 전류의 진동적인 불안정상태가 일어난다고 보고하고 있으나 본 실험에서는 간혹 관찰할 수 있었으나 데이터부족으로 이에 대한 고찰은 다음 기회로 미루겠다.

### 3.3 epi層의 壽命測定の 타당성 與否

전술한 바와같이 epi층을 relaxation case의 반도체에 적용시켜 V-I특성을 고찰하였으나서 3-I절에서 검토한 바와같이 Si epi층의 저항이 상당히 크기 때문에 光조사에 의해 적당한 캐리어를 증가시켜 relaxation case의 조건인 유전완화시간  $\tau_d$ 가 소수캐리어 수명  $\tau$ 보다 큰 범위의 상온에서 현상을 검토하여 통상의 수명을 측정했지만 그때의 光조사가 유효한 수명을 구하는 적절한 방법이었는지 의문이 가고 과연 relaxation case와 lifetime case와는 어떠한 相異點이 나타나는 것인지 또는 같은 것인지 문제가 되므로

(1) 基本關係式

(2) optical generation과 thermal generation

으로 나누어 검토해 보겠다.

(1) 基本關係式

앞에서 기술한 (5)식과 같이 relaxation case에서는 정공(p)과 전자(n)의 캐리어 밀도積이 열평형이외의 정상상태에서도 열평형상태에서의 값인  $n_i^2$ 과 같은 특징이 있으나 光에 의한 電子-正孔雙의 생성이 정상적으로 행해지는 relaxation case의 系에서도  $np$ 積(3)식에 적용하는

$$np = n_i^2 + \frac{\tau}{2} (p_0 + n_0) \Delta g \quad (6)$$

로 정해진다.

여기서  $p_0, n_0$ 는 각각 열평형상태에서의 정공 및 전자 밀도,  $\tau$ 는 전술한 캐리어 수명,  $\Delta g$ 는 光에 의한 電子-正孔雙의 생성율(generation rate)이다.

따라서 (4)식은 정상적인 光조사를 한 系에 있어서도  $np$ 積이 항상 일정하게 된다는 의미로 dark에서의

relaxation case의 基本式과 같다.

그러므로 이와같은 系에 Roobroek<sup>12)</sup>의 이론을 적용시키는 것은 가능하다고 볼 수 있다.

(2) Optical generation과 thermal generation

여기서는 optical generation이 존재하는 relaxation case系에서 단순히  $n_i$ 가 다른 어느 상수  $n_i'$ 으로 된 소위 optical generation과 thermal generation을 같다고 보아도 좋은가 하는 것인데 우리들은 그렇지않다고 본다.

즉 (6)식의 우변 제 1항과 제 2항을 비교해 보면 알 수있는 바와같이 제 1항은 단순히 온도에 의해서만 정해지나 제 2항은 시료의 doping에 의존하는 인자를 갖고 있기 때문에 relaxation case에서도 optical case와 lifetime case의 상이점은 (6)식의 관계식이 충족하는가에 의존하므로 여기에 주목하면 relaxation case의 특징을 발견할 수있을 것이다.

본 실험결과로부터 전술한 바와같이 대체로 (6)식을 만족하므로 epi층單體인 경우에는 의문이 있겠지만 p-n접합만은 relaxation case의 반도체로 취급하여도 무방할 것 같다.

이상과 같이 검토해 본 결과 본 실험의 경우와 같이 wafer상에 진성의 고저항 Si epi층( $2 \times 10^5 [\Omega \cdot \text{cm}]$ )만을 성장시키면 semi-insulating化合物반도체나 有機 반도체 또는 유리반도체 등과 같이  $\tau_a \gg \tau$ 을 만족하여 relaxation case로 볼 수 있는 반도체가 실현될 수 있음을 발견하였고 앞으로의 relaxation case반도체 제조의 한 지침이 될 수 있을 것이다.

또한 relaxation case의 반도체에 光을 조사함으로써 캐리어의 농도를 일단 변화시키면 이것이 원상태로 돌아갈 때까지의 긴 완화시간  $\tau_a$ 를 가지므로 이것이 記憶素子로서 사용될 가능성이 있을 것이고 앞으로의 응용면이 기대된다.

4. 結 論

이상의 실험결과 및 고찰에 의해 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) epi층에서의 소수캐리어수명은 보통의 bulk에서의 수명과 비교해서 상당히 짧았으며 이것은 epi층의 두께가 너무 얇기 때문에 표면재결합확율이 높아지기 때문이라고 생각된다.

(2) epi층에서의 캐리어수명은 온도가 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하였으며 이것은 single trap level을 가정한 Shockley-Read의 재결합에 대한 이론식과 잘 일치하였다.

(3) 고저항 Si epi층과 bulk가 이룬 p-n접합의 특성

은 통상의 lifetime case의 특성과는 아주 다른 현상이 나타나 처음에는 ohmic영역( $I \propto V$ )이 있고 다음에 sublinear한 영역( $I \propto V^{1/2}$ )을 거쳐 공간전하제한전류영역( $I \propto V^2$ )에 이르고 마지막으로 부정저항영역이 나타났다.

이와같은 현상을 고저항인 Si epi층으로 인하여 유전완화시간이 소수캐리어수명보다 더 큰 소위 relaxation case반도체로 됨을 가정하여 고찰한 결과 정상적으로 relataxion case반도체로 취급가능이 해결되었고 이와같은 반도체의 특징으로서

① 소수캐리어의 注入으로 인하여 다수 캐리어의 공간을 유도하고

② 공간전하영역에서 비저항  $\rho$ 가 최대치를 가지며

③ ①및 ②를 포함한 특이한 p-n접합의 V-I 특성을 가지는 것등으로 생각된다.

(4) epi층과 같은 relaxation case반도체에 光을 조사한 경우에도 이 系의 특징인  $np$ 積이 항상 일정하게 됨을 알 수 있었으며 이와같은 系에 Roobroek<sup>12)</sup>의 이론을 적용시킬 수 있으나 optical generation이 있는 relaxation case系에서는 optical generation과 thermal generation은 doping effect로 인하여 같지 않았다.

(5) relaxation case 반도체의 응용으로서는 기억장치의 한 소자로서 이용될 것이 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) H.C. Theuerer., "Epitaxial Silicon Films by the Hydrogen Reduction of SiCl<sub>4</sub>," J. Electrochemi. Soc., **108**, 649(1961).
- 2) R.M. Burger et al., Fundamentals of Silicon Integrated Devices Technology. Vol. I, Prentice-Hill (1967).
- 3) P.F. Kane et al., Characterization of Semiconductor Materials, McGraw-Hill (1970).
- 4) D.T. Stevenson et al., "Measurement of Carrier Lifetimes in Ge and Si." J. Appl. Phys. **26**, 190(1955).
- 5) J.G. Kreer "Measurement of Minority Carrier lifetime in Ge and Si by the Method of Photoconductive Decay", I.R.E. August, 1292 (1961).
- 6) R.L. Watters et al. "Measurement of Minority Carrier Lifetime in Si", J. Appl. Phys. **27**, 489(1956)

- 7) J.R. Haynes et al. "Trapping of Minority Carrier in Si: Part I, p-Type Si" Phys. Rev, **97**, 311(1955).
- 8) J.R. Haynes et al, "Trapping of Minority Carrier in Si: Part II, n-Type Si", Phys. Rev, **100**, 835(1955).
- 9) W. Shockley et al, "Statistics of Recombinations of Hole and Electrons", Phys. Rev, **87**, 835(1952).
- 10) W. Shockley, Electrons and Holes in Semiconductor D. Van Nostrand Company (1950).
- 11) H.J. Queisser et al. "Carrier Transport and Potential Distributions for a Semiconductor p-n Junction in the Relaxation Regime", Phys. Rev, Lett, **26**, 551(1971).
- 12) W.V. Roosbroeck, "Transport in Relaxation Semiconductor", Phys. Rev. **35**, 2154(1972).
- 13) A. Rose, "Space Charge-Limited Currents in Solids" Phys. Rev, **97**, 1538(1955).
- 14) M.A. Lampert, "Simplified Theory of Space-Charge-Limited Currents in an Insulator with Traps", Phys. Rev, **103**, 1648(1956).
- 15) M.A. Lampert, "Double Injection in Insulator" Phys. Rev, **125**, 126(1962).
- 16) W.H. Weber et al, "Double Injection in Semiconductors Heavily Doped with Deep Two-Level Traps" Solid-St Electron **13**, 1333 (1970).