

광제어 쌍안정 반도체 스위치에서 구리 불순물이 스위치 특성에 미치는 영향

논문
7-3-4

Effects of Cu impurity on the switching characteristics of the optically controlled bistable semiconductor switches

고 성 태*
(Sung-taek Ko)

Abstract

Cu compensated Si doped GaAs (GaAs:Si:Cu) has been chosen as the switch material. The GaAs material has been characterized by DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy) technique and the obtained data were used in the computer simulation. Simulation studies are performed on several GaAs switch systems, composed of different densities of Cu, to investigate the influence of deep traps in the switch systems. The computed results demonstrates important aspect of the switch, the existence of two stable states and fast optical quenching. An important parameter optimum Cu density for the switch are also determined.

Key Words(중요용어) : Bistable semiconductor switch(쌍안정 반도체 스위치), GaAs(갈륨비소), Cu impurity(구리 불순물)

1. 서 론

반도체 내의 불순물 에너지 준위를 이용하여 만든 광제어 쌍안정 스위치는 새로운 형태의 스위치로서 기본적인 개념은 1988년 Schoenbach에 의해서 처음 도입되었으며 스위치로서의 가능성은 CdS:Cu 시스템¹⁾과 GaAs:Si:Cu 시스템^{2,3)}에서 증명되었다.

광제어 쌍안정 반도체 스위치(Optically Controlled Bistable Semiconductor Switch : OCBSS)는 여러가지 장점을 가지고 있다. 첫째, 스위치를 도통(On)시키는데 트리거에 필요한 광에너지만 소비되고 On상태를 유지하는데는 광에너지가 소비되지 않으므로 효율이 높다. 둘째, 다른 반도체 스위치 소자와는 달리 pn 접합이 없으므로 스위치의 크기에 제한을 받지않는다. 셋째, 광흡수가 불순물 준위에 의한 흡수이므로 흡수 깊이(absorption depth)가 크고 또한 불순물의 농도를 조절함에 의해서 흡수깊이의 조절이 가능하다. 넷째, 스위치의

제어가 광신호에 의해서 제어되므로 속도가 빠르다. 이러한 장점들로 인해 OCBSS는 차세대 스위치 소자로서 각광을 받을 것으로 기대되고 있다.

스위치의 개념은 깊은 불순물 준위(deep impurity level)에 저장되어 있는 전자의 광이온화(photoionization)와 그 전자들에 대한 광소거(optical quenching)에 근거를 둔다. OCBSS의 스위치 동작은 깊은 불순물 준위의 농도와 단면적(cross section)에 크게 의존하므로 깊은 불순물 준위에 대한 특성조사가 스위치를 만드는데 필수적이다. 반도체 내의 깊은 불순물 준위를 조사하는 방법은 여러가지가 있으나 DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy)방법이 널리 사용되고 있다. DLTS 방법은 Lang에 의해서 소개되었다.⁴⁾ 이 방법은 결정내의 불순물의 스펙트럼을 양과 음의 침두치를 온도의 함수로서 표현할 수 있다. 침두치의 부호는 전자트랩 인지 홀트랩 인지를 결정하게 해주며 침두치의 크기는 그 불순물의 농도를 결정하게 해준다.

반도체 소자내의 자유 캐리어에 대한 동적특성은 Shockley-Reed-Hall(SRH) 재결합 모델에 의해서 해석되어 왔으며 SRH 모델은 과잉 캐리어의 생성과 재결합은 두개의 결합된 비선형 방정식으로 표현된다. 이러한 비선형의 방정식은 어떤 특

* : 제주대학교 전자공학과
접수일자 : 1993년 7월 5일
심사완료 : 1994년 3월 17일

정한 경우를 제외하고는 일반적인 해가 없다. Sah는 SRH 모델을 근거로 재료의 물리적 성질을 회로소자와 연관시켜 자유캐리어의 수명을 해석할 수 있었으며⁵⁾ Demokan은 연속방정식을 풀어서 진성 Si의 광 전도도를 이론적으로 계산하였다.⁶⁾ Iverson과 Smith는 시간중속 convective/diffusive 연속방정식을 이용하여 InP : Fe 광도전소자에 대해서 수치적인 해석을 하였다.⁷⁾

본 연구에서는 광전도도에 대한 변화율 방정식(rate equation)을 사용하여 OCBSS에 대해서 모델을 세우고 수치적인 해석을 함으로써 기존의 연구 결과^{2,3)}에서 제공하지 못했던 여러가지 현상들 즉 Cu 농도의 변화에 따른 전도도의 변화와 OCBSS의 스위칭 동작 구조를 규명하고자 한다. OCBSS에 대한 재료적 특성은 DLTS를 사용하여 조사하였고 그 결과는 스위치소자의 동작특성 해석을 위한 기초자료로써 사용되었다.

2. 스위치의 개념

광제어 쌍안정 반도체 스위치는 빛으로 반도체의 전도도를 증가 또는 감소시켜 스위치 작용을 하게한 소자로서 GaAs에 깊은 억셉터 불순물(Cu)과 얇은 도너 불순물(Si)를 첨가하여 제작한다. 깊은 억셉터가 얇은 도너를 보상하게 되어 이 소자는 고저항의 재료로 변하게 한다. 즉 Fermi 준위가 금지대의 중앙 부근에 놓이게 된다. 따라서 대부분의 깊은 억셉터에는 얇은 도너에서 제공된 전자들로 채워지게 된다. 여기서 깊은 억셉터 준위는 전하 캐리어를 저장하는 에너지 준위로서 작용하게 되며 그 동작원리는 다음과 같다.

그림 1은 간략화된 GaAs:Si:Cu 시스템을 보여주고 있다. GaAs 내에서 구리 불순물은 보통 두개의 에너지 준위를 생기게 하며 그것들은 보통 E_{CuA} 와 E_{CuB} 로 표시한다.⁹⁾ E_{CuA} 는 가전자대에서 0.14eV위 쪽에 위치하며 E_{CuB} 는 가전자대에서 0.44eV 위쪽에 위치한다. 스위치의 도통 즉 전도도의 증가는 깊은 억셉터 준위(E_{CuB})에 저장되어 있는 전자를 광이온화 시켜서 전도대에 올려놓음으로서 이룩된다(그림 1(a) 참조). 여기에 사용되는 빛의 광자 에너지는 GaAs의 금지대폭($E_g = 1.42\text{eV}$)보다 작고 $E_C - E_{CuB}$ 보다는 큰 에너지를 갖는 빛 즉 파장이 대략 980nm~1200nm(1.26eV~1.03eV)되는 빛이 사용된다. 따라서 전자를 가전자대에서 전도대로 직접 이온화(direct band-to-band ionization)하는 것은 불가능하지만 가전자대에서 E_{CuB} 준위로 E_{CuB} 준위에서 전도대로 여기시키는 2단계 이온화

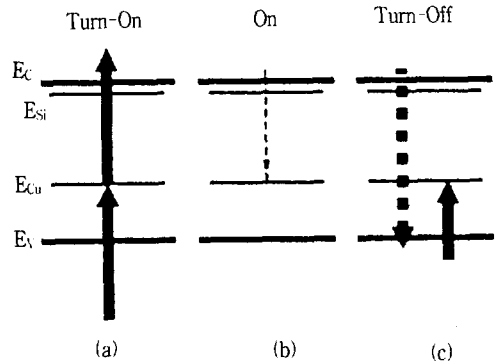


그림 1 스위치의 광이온화 과정(실선)과 재결합 과정(점선)

Fig. 1 Optical ionization processes(solid lines) and recombination processes(dashed lines) during different stages of the switch.

는 가능하다. 여기서 1.26eV의 광자 에너지는 E_{CuA} 에서 전도대로 여기시키기 위해서 필요한 에너지 1.28eV보다 작으므로 E_{CuA} 는 스위치의 광이온화 과정에 아무런 기여를 하지 못하게 된다. 이처럼 스위치의 전도도의 증가(Turn-On)는 2단계 이온화에 의한다. Turn-On 하기위한 광 에너지가 없어진 후 E_{CuB} 에 트랩(trap)된 전자들은 재빨리 가전자대로 내려가게 된다. 이것은 E_{CuB} 의 홀 포획단면적(capture cross-section : $\sigma_p = 3 \times 10^{-14} \text{cm}^2$)이 매우 크기 때문이다.⁸⁾ 한편 여기된 자유전자들은 가전자대에 재결합할 홀이 없기 때문에 계속 전도대에 머무르면서 전기 전도에 기여하게 된다. 물론 전도대에 머무르는 전자들이 다시 E_{CuB} 에 트랩될 수 있으나 E_{CuB} 준위의 전자 포획단면적($\sigma = 8 \times 10^{-21} \text{cm}^2$)이 매우 적기 때문에⁸⁾ E_{CuB} 준위에 다시 트랩되기 까지는 매우 오랜 시간이 걸린다(그림 1(b) 참조). 따라서 이 스위치는 스위치를 트리거하는 데에 만 광 에너지가 필요하고 도통상태(높은 전도도의 상태)를 유지하기 위해서는 빛 에너지가 필요하지 않게 된다.

스위치의 개방 즉 전도도의 감소는 전하 캐리어를 다시 깊은 억셉터 준위에 저장하는것에 의해서 얻어진다. 그렇게 하기위해서 빛의 광자 에너지가 $E_C - E_{CuB}$ 보다 적고 $E_{CuB} - E_V$ 보다 큰 에너지를 갖는 빛 즉 파장이 대략 1400nm~2400nm(0.89eV~0.52eV)되는 빛이 사용된다. 이러한 에너지를 갖는 빛은 단지 가전자대에 있는 전자를 깊은 억셉터 준위로 여기시키는 것 만이 가능하며 가전자대에 정공이 생기게 한다. 따라서 전도대에 있는 전자는

가전자대에 있는 정공과 재결합하여 없어지게 된다. 이리하여 파장이 대략 1400nm~2400nm되는 빛은 전자를 가전자대에서 깊은 역섹터 준위(E_{CuB})로 여기시킴으로서 효과적으로 전도대에 있는 전자를 제거하게 된다(그림 1(c)참조). 이 처럼 광제어 쌍안정 반도체 스위치는 서로 다른 파장의 빛을 사용하여 스위치를 도통 또는 개방할 수 있다.

3. 스위치소자 재료

스위치 소자로 사용한 기본물질은 Morgan Semiconductor¹⁵⁾에서 구입한 Si가 도핑된 n형 GaAs ($N_{Si}=5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)에 Cu를 진공증착기에서 증착시킨 다음 furnace에서 650°C~750°C사이 온도에서 Cu를 확산시켜 스위치를 제작하였다. 스위치소자에 사용한 기본 재료인 GaAs는 Si이나 Ge처럼 단일 물질로 이루어진 반도체가 아니므로 GaAs물질 자체가 갖는 결함이 많은 것으로 알려지고 있다. 특히 불순물 에너지 준위를 이용하여 스위칭 소자를 만들려고 하는 본 연구에서는 GaAs 물질 자체가 갖고있는 결함에 대하여 조사하는 것이 매우 필요하다. Cu를 도핑하기 전에 GaAs물질에 대한 결함을 DLTS 방법을 사용하여 조사하였으며 그 결과는 그림 2에서 보여주고 있다. 이 스펙트럼은 GaAs재료가 두개의 전자 트랩을 갖고 있음을 보여주고 있다. 이러한 결함들은 결정성장시 생긴 원천적인 결점들로서 외부에서 도핑에 의한 것이 아니다. 이 전자트랩들은 EL2와 EL5로 명칭된 전자 트랩으로 여겨진다.^{10,11)} 이 불순물들의 에너지 준위는 일련의 DLTS 스펙트럼에서 얻어진 Arrhenius plot에서 얻어지며 그림 3은 이 결점들에 대한 Arrhenius plot를 보여주고 있다. 이 그림으로부터 EL2 준위는 전도대에서 0.83eV 떨어져 있고 EL5 준위는 전도대에서 0.41eV 떨어져 있으며 두 준위 모두 전자트랩임이 판명되었다.

얇은 도너 불순물인 Si를 보상하기 위한 깊은 역섹터 불순물은 Cu이다. Cu 불순물 도핑에 따른 전도도는 전하중성 조건을 이용하여 계산되어졌으며 그 결과는 그림 4에서 보여주고 있다. 광전도 스위치(photo-conductive switch)는 스위치 개방시 누설전류를 줄이기 위해 가능한 한 높은 저항을 갖는 스위치 재료를 필요로한다. 그림 4는 Cu를 적절히 도핑하여 낮은 도너를 보상하여 줄 경우 높은 저항을 갖는 재료를 만들 수 있음을 보여주고 있다.

4. 광스위치소자의 스위칭동작 특성해석

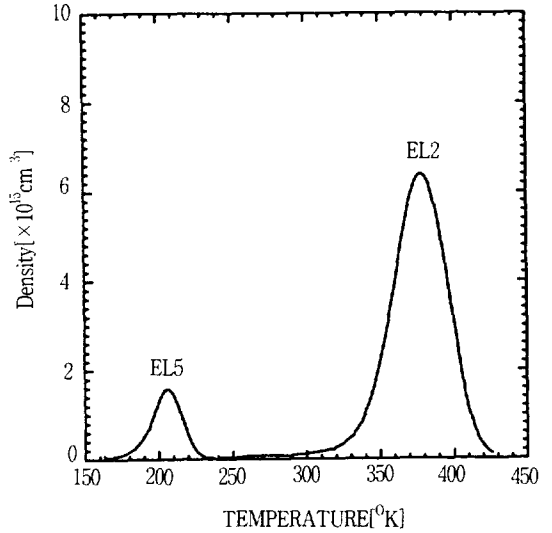


그림 2 GaAs 재료에서 측정된 DLTS 스펙트럼
Fig. 2 A DLTS spectrum measured on a GaAs sample.

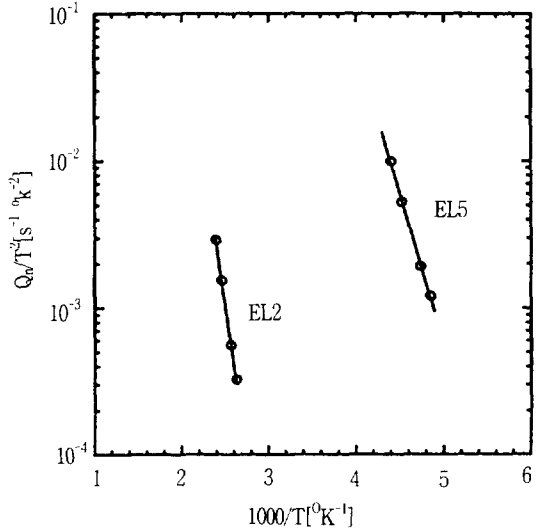


그림 3 DLTS 스펙트럼에 대한 Arrhenius plot
Fig. 3 Arrhenius plots for the DLTS spectrum.

캐리어가 구속된 상태에서 자유상태로의 천이는 열이나 광에너지에 의해서 얻어진다. 캐리어가 자유상태로 여기되면 그 캐리어는 다시 재결합하여 없어지거나 불순물 에너지 준위에 트랩될 때 까지 그 물질의 전도도 증가에 기여하게 된다. 이러한 캐리어의 동작 특성은 아래의 변화율 방정식에 의해서 기술될 수 있다.¹⁴⁾

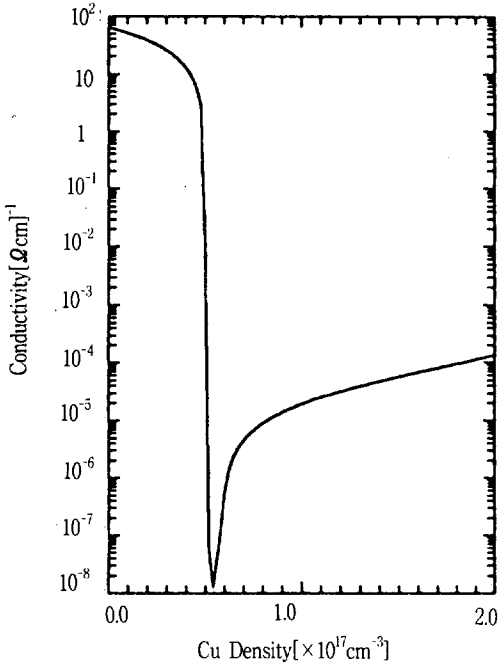


그림 4 Si가 도핑된 GaAs재료의 Cu농도 변화에 따른 전도도의 변화

Fig. 4 Conductivity as a function of density of diffused Cu in Si doped GaAs

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\beta h\nu \phi^2}{2} + \sum e_{ni} n_{Ti} - k_{an}p - \sum c_{ni} n(N_{Ti} - n_{Ti}) - k_a n^2 p \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\beta h\nu \phi^2}{2} + \sum e_{ni} n_{Ti} - k_{an}p + \sum c_{pi} p n_{Ti} + k_a n^2 p \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_{Ti}}{\partial t} = (c_{ni} n + e_{ni}) n_{Ti} - (c_{pi} p + e_{pi}) n_{Ti} \quad (3)$$

- 여기서 n, p : 자유전자, 자유 홀 농도
- N_{Ti} 전체 트랩 농도
- n_{Ti} 전자로 채워진 트랩 농도
- $h\nu$ 광자 에너지
- k_d 직접 대역간 재결합 계수
- k_a Auger 재결합 계수
- $c_{n,p}$ 전자, 홀 capture parameter
- $e_{n,p}$ 전자, 홀 emission rate
- ϕ 광자 flux

GaAs 스위치 소자의 동작특성에 대한 해석은 위의 미분방정식을 수치적으로 적분함에 기초를 두고 있다. 수치적 해석은 가변 제어그리드가 가능

한 5차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. 수치해석에 사용된 각종 파라미터들은 표 1에 열거되어 있다. 스위치에 대한 전도도의 계산은 Demokan등이 사용한 방법을 사용하였다.¹⁴⁾

광이온화와 광 소거를 시키기 위해서 두개의 서로 다른 파장을 갖는 레이저가 수치해석에 사용되었다. 광자 에너지가 1.1eV(FWHM 10ns)인 레이저는 스위치의 전도도를 증가(On) 시키기 위해서 광자 에너지가 0.7eV(FWHM 10ns)인 레이저는 전

표 1 수치해석에 사용된 계수

Table 1 Parameters used in the numerical analysis.

parameters	값	참고문헌
σ_n (CuB)	$8 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$	(8)
σ_p (CuB)	$3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$	(8)
σ_{no} (CuB)	10^{-17} cm^2	(9)
σ_{po} (CuB)	10^{-16} cm^2	(9)
σ_n (EL2)	$4 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	(10)
σ_p (EL2)	$2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	(10)
σ_{no} (EL2)	$8 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	(11)
σ_{po} (EL2)	$3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	(11)
σ_n (EL5)	$5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$	(10)
σ_p (EL5)	$2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	(10)
σ_{no} (EL5)	10^{-17} cm^2	[*]
σ_{po} (EL5)	10^{-17} cm^2	[*]
σ_n (CuA)	$8 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$	[9]
σ_p (CuA)	$3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$	[9]
σ_{no} (CuA)	10^{-17} cm^2	[*]
σ_{po} (CuA)	10^{-16} cm^2	[*]
β	26 cm/GW	(12)
K_a	$10^{-33} \text{ cm}^{-6} \text{ s}^{-1}$	(13)
K_d	$7 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	(14)

* 이 표시가 된 파라미터는 아직까지 규명되지 못한 값들로 적절한 값으로 설정되었다.

도도를 감소(Off) 시키기 위해서 사용되었다. 레이저 펄스의 시간적 변화는 Gauss 분포를 갖는 것으로 가정하였으며 Turn-On 레이저의 침투치는 $t=30\text{ns}$ 에 인가되고 Turn-Off 레이저의 침투치는 $t=170\text{ns}$ 에 인가된다. 여러가지 불순물 농도에 대한 스위치의 동작특성을 살펴보기 위해서 얇은 도너 농도 N_{Si} 는 $5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 를 사용하였고 깊은 억셉터 불순물 농도 N_{Cu} 는 $4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 에서 $2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 까지를 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

그림 5는 스위치 동작에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과이며 스위치의 시간의 변화에 따른 전도도의 변화를 보여주고 있다. 이 그림은 스위치 소자의 전도도가 트리거하기 위한 레이저 펄스가 없어진 후에도 On 상태의 높은 전도도가 유지되는 것을 보여주고 있으며 또한 Turn-Off 레이저의 인가는 스위치의 전도도를 감소시키고 있음을 보여준다. 따라서 이 스위치는 On, Off 시키기 위하여 단지 트리거하기 위한 광에너지만이 소모되므로 쌍안정성을 갖는다. 제일 위에 위치한 점선으로 표시된 전도도의 값은 Cu 농도가 $5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 인 경우이고 중간에 실선으로 표시된 전도도는 Cu 농도가 10^{17}cm^{-3} 인 경우이며 제일 아래에 점선으로 표시된 전도도는 Cu 농도가 $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 인 경우를 나타낸다. 이 그림은 N_{Cu} 가 10^{17}cm^{-3} 보다 낮을 때는 비교적 안정된 On 상태를 가짐을 보여주고 있으며 N_{Cu} 가 10^{17}cm^{-3} 보다 높은 경우에 스위치의 전도도가 매우 낮게됨을 보여주고 있다. 위의 결과들은 Turn-On과 Turn-Off 레이저의 광자 flux가 모두 $10^{25}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($1.8\text{MW}/\text{cm}^2$)일 때의 스위치의 전도도의 변화이며 이 결과는 실제 스위치 소자에서 측정된 전도도의 변화의 형태와 잘 일치한다.^{2,3)}

그림 6은 Cu 농도의 변화에 대한 전도도 변화를 보여주고 있다. 여기서 Peak로 표시된 전도도의 값은 Turn-On 레이저가 인가된 후 스위치의 전도도가 최대일 때의 값이다. On으로 표시된 전도도의 값은 150ns에서의 전도도를 나타내고 Off로 표시된 전도도의 값은 200ns에서의 전도도를 나타낸다. 이 그림에서 보면 On 상태는 낮은 Cu 도핑일 수록 유리하고 Off상태는 높은 Cu 도핑이 유리함을 알 수 있다. 왜냐하면 On상태는 가능한 높은 전도도가 되어야하고 Off상태는 가능한 낮은 전도도가 낮아야 하기 때문이다. 그림 7은 스위치의 Turn-On 특성을 보여주는 그림으로 Cu 농도의 변화에 대한 On 상태 전도도의 변화율을 보여

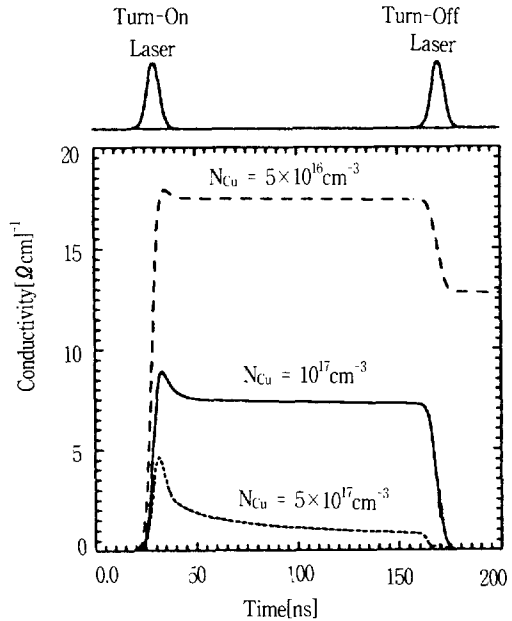


그림 5 On-Off 트리거 레이저 펄스가 인가될 때의 스위치 소자의 전도도 변화

Fig. 5 Temporal variation of conductivity of the switch during the On-Off trigger laser pulses are introduced.

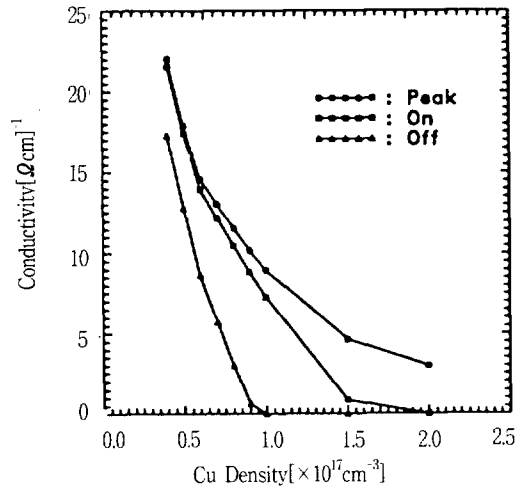


그림 6 Cu 농도에 대한 Peak, On, Off 상태의 전도도

Fig. 6 Conductivity of Peak, On, and Off state as a function of Cu density

주고 있다. 여기서 세로축은 On 상태의 전도도 (σ_{on})를 최대 전도도(σ_{peak})로 나눈 값을 나타내고

있다. N_{Cu} 가 $10^{17}cm^{-3}$ 일 때 On 상태의 전도도는 최대 전도도의 약 80%가 됨을 보여주고 있다. Cu 농도의 변화에 따른 스위치의 Turn-Off 특성은 그림 8에서 보여주고 있다. 그림 7의 Turn-On 특성과 유사하게 세로축은 On 상태의 전도도(σ_{on})를 Off 상태의 전도도(σ_{off})로 나눈 값을 나타내고 있다. 이 값은 스위치가 Turn-Off 할 때 전도도의 변화하는 율을 보여주는 것으로 N_{Cu} 가 $10^{17}cm^{-3}$ 일 때가 가장 크고 그 값은 대략 3×10^4 정도가 됨을 보여주고 있다.

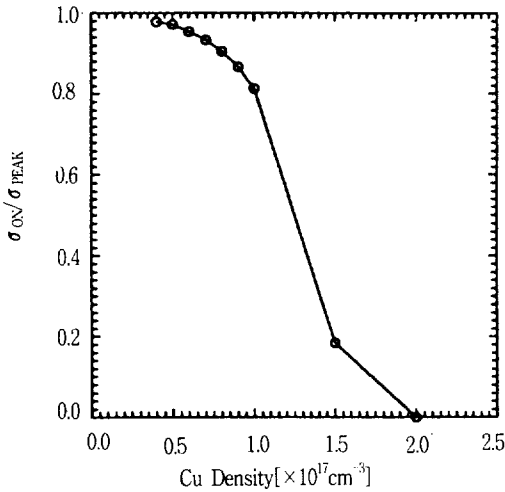


그림 7 스위치의 Turn-On 특성
Fig. 7 Turn-on characteristics of the switches.

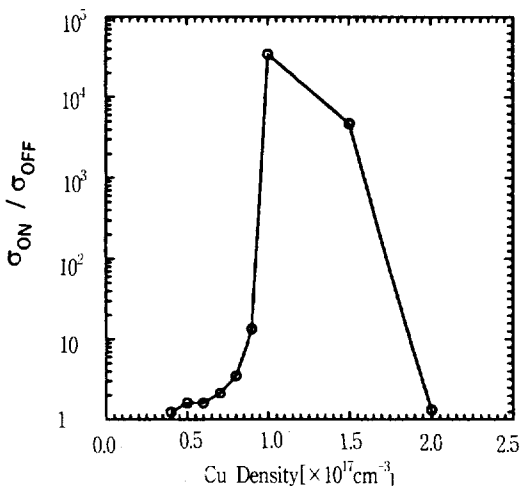


그림 8 스위치의 Turn-Off 특성
Fig. 8 Turn-Off characteristics of the switches.

본 연구에서는 Si 이 도핑된 GaAs에 Cu를 보충한 물질을 광제어 반도체스위치 소자로써 사용하였다. 기본 물질인 GaAs는 DLTS방법에 의해 결함이 조사되었으며 EL2 준위와 EL5 준위의 기본적으로 존재함을 알 수 있었다. 변화율 방정식을 통한 여러가지 Cu 농도에 대한 스위치 특성해석들로부터 다음의 사실을 알 수 있었다.

첫째 Cu로 도핑시킨 GaAs는 준 안정된 On상태(높은 전도도의 상태)를 갖는다. (즉 쌍안정성을 갖는다.)

둘째 광 에너지를 사용하여 자유 캐리어를 소거할 수 있다. (레이저를 사용하여 스위치의 전도도를 낮출 수 있다.)

셋째 스위치의 Turn-On 특성은 N_{Cu} 가 낮을 수록 좋으나 Turn-Off 특성은 나빠지므로 $N_{Si} = 5 \times 10^{16}cm^{-3}$ 일 때 $N_{Cu} = 10^{17}cm^{-3}$ 정도가 쌍안정 스위치로써 가장 적절한 농도이다.

※ 이 논문은 1992년 한국 학술진흥재단의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

1. R.K. Germer, K.H. Schoenbach and S.G.E. Pronko, "A bulk optically controlled semiconductor switches", J. Appl. Phys., 64, pp. 913-917, 1988.
2. M.S. Mazzola, K.H. Schoenbach, V.K. Lakdawala, S.T. Ko, "Nanosecond optical quenching of photoconductivity in a bulk GaAs switch", Appl. Phys. Lett. 55, pp. 2102-2104, 1989.
3. S.T. Ko, V.K. Lakdawala, K.H. Schoenbach, M.S. Mazzola, "Influence of copper doping on the performance of optically controlled GaAs switches", J. Appl. Phys., 67, pp.1124-1126, 1990.
4. D.V. Lang, "Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors," J. Appl. Phys., 45, pp.3023-3032, 1974.
5. C.T. Sah, "The equivalent circuit model in solid-state electronics-part 1", Proc. IEEE, 55, pp.645-671, 1967.
6. M.S. Demokan, M.S. Ozyazici, "The interaction of mode-locked laser pulses with intrinsic silicon", Int. J. Electron., 51, pp.93-143, 1981.

6. 결 론

7. A.E. Iverson and D.L. Smith, "Mathematical modeling of photoconductor transient response", IEEE Trans. Elect. Dev., ED-34, pp.2098-2107, 1987.
8. D.V. Lang and R.A. Logan, "A study of deep levels in GaAs by capacitance spectroscopy", J. Electron Mater., 4, pp.1053-1066, 1975.
9. N. Kullendorf and L. Jansson, "Copper-related deep level defects in III-V semiconductors", J. Appl. Phys., 54, pp.3203-3212, 1983.
10. A. Mitonneau, A. Mircea, G.M. Martin and D. Pons, "Electron and hole capture cross section at deep centers in gallium arsenide", Rev. Phys. Appl.(France), 14, pp.853-861, 1979.
11. G.M. Martin, "Key electrical parameters in semi-insulating materials: the methods to determine them in GaAs", Proceedings of the Semi-insulating III-V Materials Conference, Nottingham, Shiva, pp.13-29, 1980.
12. T.F. Boggess, JR., A.L. Smirl, S.C. Moss, I.W. Boyd and E.W. Vanstryland, "Optical limiting in GaAs", IEEE J. Quant. Elec., QE-21, pp.488-494, 1985.
13. M. Takeshima, "Auger recombination in GaAs", J. Appl. Phys., 43, pp.4114-4119, 1972.
14. M.S. Demokan and M.S. Ozyazici, "High speed optoelectronic gallium arsenide switch triggered by mode locked laser pulses", Int. J. Electronics, 55, pp.699-727, 1983.
15. Morgan Semiconductor Div., Ethyl Corp., Garland, Tx75047-2367, USA.

저자소개



고성택

1955년 1월 12일생. 1980년 인하대학교 전자공학과 졸업. 1984년 햄프턴 대학교(미국) 물리학과 졸업(석사). 1989년 올드도미니언 대학교(미국) 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공학). 1989년-90년 올

드도미니언 대학교 연구조교수. 1990년-91년 경남대학교 전임 강사. 1994년 현재 제주대학교 조교수.