

ИНЖЕКЦИОННЫЙ ТОК В ОБЛУЧЕННЫХ СЛОИСТЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ СУЛЬФИДА ГАЛЛИЯ

Р.С.МАДАТОВ, А.Р.НАДЖАФОВ, Ш.П.ШЕКИЛИ, Т.Б.ТАГИЕВ

*Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана
AZ 1143, Баку, пр. Г.Джавида, 31*

Были исследованы ВАХ высокоомных кристаллов сульфида галлия в диапазоне 120÷350К, а также облученных гамма квантами дозой 30÷800крад в направлении перпендикулярном оси *c*. Установлено, что механизм токопрохождения в этих полупроводниках существенно определяется температурой, при которой проводятся измерения. При относительно высоких температурах ВАХ исследуемых образцов подчиняются ТООЗ.

ВВЕДЕНИЕ

Свойства многих твердых тел существенно изменяются под действием различных типов излучений. Уже на ранней стадии изучения полупроводников стало ясно какую важную и во многих отношениях определяющую роль в их свойствах играют различные дефекты. Проблема порчи материала как и возможности восстановления его свойств требует ясного понимания природы и свойств радиационных дефектов, причин их образования и дальнейшей эволюции [1-3].

Одним из наиболее важных факторов, определяющих радиационную стойкость твердых тел при облучении, является структура кристаллической решетки. В связи с этим в последние годы большое внимание уделяется изучению радиационного изменения физических свойств слоистых полупроводников. Обнаружено радиационное изменение проводимости слоистых кристаллов при облучении электронами, что свидетельствует о возможности создания радиационных дефектов при облучении.

Слоистые полупроводниковые соединения типа A^3B^6 представляют интерес как перспективные материалы для полупроводниковых детекторов элементарных частиц и жесткого электромагнитного излучения [4,5].

Характер структуры и химическая природа соединений типа A^3B^6 вызывают определенный интерес с точки зрения исследования их фотоэлектрических свойств. В частности, по координации атомов и характеру связей между ними исследуемые кристаллы слоистых полупроводников A^3B^6 напоминают соединения A^2B^6 (CdS, CdSe и т.д.), которые являются хорошими фотопроводниками [3-5]. Повышенный интерес к этим соединениям вызван тем обстоятельством, что, несмотря на их сильную дефектность, они обладают высокой фоточувствительностью к видимому, ИК и УФ, а также рентгеновскому и гамма излучениям. Характер химической связи и электронных свойств в полупроводниках типа A^3B^6 возникает благодаря непарному числу электронов. Такие неполновалентные соединения типа GaS, GaSe, InSe стабилизируются обычно в решетке со слоистой и цепочечной структурой [9]. Избыток электронов компенсируется катионными парами, вследствие чего образуется структура полупроводниковых зон.

В данной работе исследовалось влияние гамма радиации на некоторые электрические и фотоэлектрические свойства слоистого монокристалла GaS. Основными носителями тока в слоистом монокристалле GaS являются дырки. Однако инжектированные неосновные носители тока существенно влияют на все электронные процессы, происходящие в полупроводнике. В частности, сюда входят электрические и фотоэлектрические свойства и эффект переключения.

Поэтому определение в GaS уровней захвата электронов и изучение инжектированных токов, а также влияние на них радиации представляют несомненный интерес. Для этого одним из испытанных методов является изучение токов, ограниченных объемными зарядами (ТООЗ).

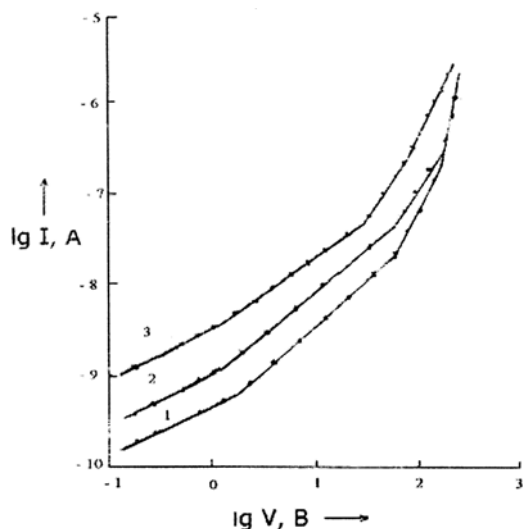
ПОЛУЧЕНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованные монокристаллы GaS выращивались методом направленной кристаллизации. При выращивании GaS методом Бриджмена использовали избыток серы (1.5ат%). Полученные монокристаллы GaS обладали р-типом проводимости, и удельное сопротивление при 300К составляло $10^9 \div 10^{10}$ Ом·см. Омические индиевые контакты наносились на торцы образцов путем сплавления. Источником облучения служил Co^{60} с энергией 1.33МэВ и плотностью потока излучения $1.4 \cdot 10^{11}$ квант/с·см². Образцы облучались при комнатной температуре. Отжиг облученных образцов проводился в вакууме при температуре 350÷500°С.

Измерения проводились при различных температурах в интервале 120÷300К на образцах толщиной $d=30 \div 50$ мкм. Электроды наносились на боковые свежесколотые грани с зеркальной поверхностью так, чтобы ток протекал вдоль оси c .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Вольтамперные характеристики слоистого монокристалла GaS, измеренные при различных температурах, приведены на Рис.1. Эти кривые соответствуют



случаю, когда контакт из индия служит катодом. Из Рис.1 видно, что у всех образцов наблюдаются четко выраженные участки, где зависимость тока меняется по степенному закону $j \sim U^n$. Линейный участок наблюдается в области полей $10 \div 10^2$ В·см, и с ростом температуры данный участок расширяется, а напряжение перехода увеличивается. Квадратичный участок ($n=2$) и область резкого роста ($m=3$) с ростом температуры уменьшаются.

Рис. 1.

Инжекционные токи в сульфиде галлия при различных температурах:
1– 120К, 2– 200К, 3– 300К.

Насыщения токов не наблюдалось до величины тока $j \cong 10^{-3}$ А/см². Видно, что полученная ВАХ имеет вид типичный для ТООЗ в полупроводниках с ловушками [7]. Этот факт дополнительно доказан по зависимости плотности тока от толщины образца при различных напряжениях ($T=\text{const}$). Установлено, что при этом плотность тока меняется по степенному закону $j \sim d^k$, где $k \cong -3$. Это означает, что в кристалле сульфида галлия выполняются режимы токов, ограниченных пространственным зарядом.

Из линейного участка ВАХ с учетом $\mu \sim 8$ см²/В·сек [5] по формуле

$$j = e\mu p_0 \frac{U}{d}, \quad (1)$$

где e - заряд носителя тока, μ - подвижность, d - толщина образца, U – прикладываемое напряжение, определен $p_0 = 2 \cdot 10^8$ см⁻³ при температуре 300К.

Учитывая наблюдение «ловушечного» квадратичного участка в ВАХ монокристалла GaS, предполагаем, что ловушки расположены выше равновесного уровня Ферми, т.е. выполняется условие $(E_t - F)/kT \gg 1$, и поэтому в исходном состоянии GaS уровни полностью незаполнены. Из анализа ВАХ следует, что в GaS имеются центры захвата электронов с энергией $E_t > kT$ ниже дна зоны проводимости и более мелкие уровни захвата.

Согласно [6], из зависимости $\lg \theta(1/T)$ (Рис.2) вычислены E_t – энергия активации локализованных состояний и их концентрация N_t . Для вычисления θ – доли свободных носителей, относительно сидящих в ловушках при различных температурах, были использованы экспериментальные данные по напряжению перехода от закона Ома к ловушечному квадратичному закону и вычисленной p_0 , а также $\varepsilon = 8$ [6]. Из Рис.3 видно, что с ростом температуры от 120 до 300К θ увеличивается от $1,3 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-4} и зависимость $\lg \theta \sim 10^3/T$ имеет два ярко выраженных наклона, которые соответствуют энергиям активации 0,02 и 0,5эВ, соответственно.

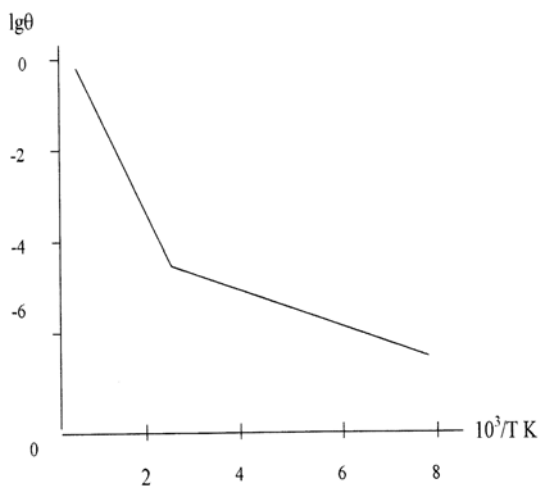


Рис.2.

Температурная зависимость параметра θ необлученного сульфида галлия.

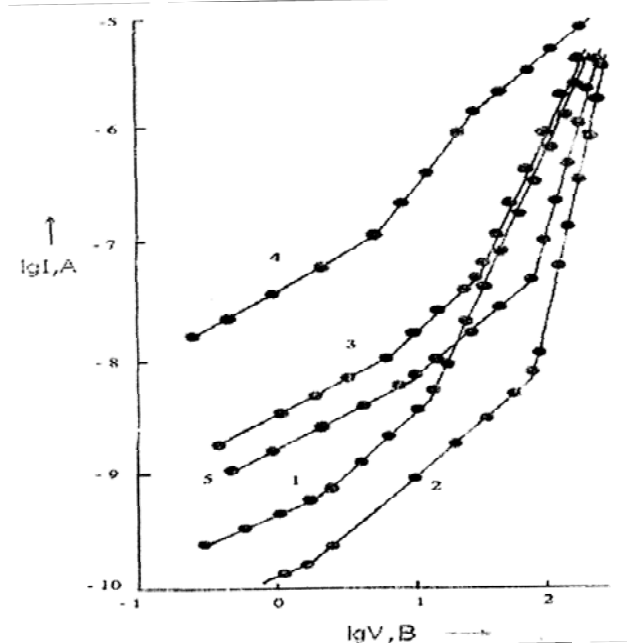


Рис.3.

Вольт-амперная характеристика сульфида галлия при $U=50В$ и различных дозах облучения: 1–необлученный образец, 2–30крад, 3–100крад, 4 – 500крад, 5 – 800крад.

Кроме того, зная напряжение перехода от закона Ома к «ловушечному» квадратичному закону, также была вычислена длина Дебая по формуле

$$\chi_{Деб} = \sqrt{\frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 T}{e^2 N}}$$

Найденные значения $\chi_{Деб} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ при $T=300К$ хорошо соответствуют значениям $\chi_{Деб}$, найденным из других вычислений.

На Рис.3 приведены ВАХ монокристалла GaS при $T=300К$ с различными дозами облучения. Из рисунка видно, что при $\Phi=30крад$ в ВАХ наблюдается ловушечная квадратичная область и область резкого роста (кривая 2). Следует отметить, что при этом значение тока значительно уменьшается по сравнению с необлученным образцом (Рис.1, кривая 3). При дозе облучения 100крад характер зависимости также сохраняется, однако значения тока увеличиваются. Дальнейший рост дозы облучения до 400 крад (кривая 4) приводит к появлению безловушечной области, где значения тока наибольшие. С дальнейшим ростом дозы облучения до

800крад величина тока уменьшается (кривая 5) и опять наблюдается ловушечная квадратичная область .

Найденные значения напряжения перехода от закона Ома к ловушечному квадратичному закону из ВАХ GaS при комнатной температуре составляли $U=80\text{В}$ ($\Phi=30\text{крад}$), $U=45\text{В}$ ($\Phi=100\text{крад}$), $U=45\text{В}$ ($\Phi=500\text{крад}$) и $U=60\text{В}$ ($\Phi=800\text{крад}$), соответственно. Отметим, что в облученных образцах при 500крад в отличие от других наблюдаются омическая ($I-U$), безловушечная квадратичная ($I-U^2$) и кубическая области ($I-U^3$). Это свидетельствует о наличии ловушек ниже равновесного положения уровня Ферми.

Таблица

$\Phi, \text{крад}$	$\rho_0, \text{см}^{-3}$	$N_b, \text{см}^{-3}$	θ	$E_{t_0}, \text{эВ}$	$\varphi, \text{эВ}$	$\chi_{\text{Деб}}, \text{см}$	$N, \text{см}^{-3}$
0	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{-3}$	1.09	0.30	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{10}$
30	$1 \cdot 10^8$	$0.7 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{-3}$	1.40	0.17	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$
100	$5.3 \cdot 10^8$	$0.45 \cdot 10^{11}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	1.045	0.4	$7.9 \cdot 10^{-5}$	$7.4 \cdot 10^{-3}$
500	$7 \cdot 10^8$	$6.3 \cdot 10^{11}$	$8.4 \cdot 10^{-3}$	0.71	0.45	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$8.3 \cdot 10^{-3}$
800	$5 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^{11}$	$5.3 \cdot 10^{-3}$	0.85	0.2035	$5 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$

Для интерпретации полученных вольт-амперных характеристик облученных образцов использовалась модель инжекционных токов, ограниченных объемным зарядом [3], позволяющая получить сведения о локальных состояниях в запрещенной зоне и объяснить форму ВАХ. Из этой модели следует, что в области малых напряжений (Рис.1, Рис.2) ВАХ описывается законом Ома до значения напряжения U_1 , при котором концентрация термически генерируемых равновесных свободных зарядов становится сравнимой с концентрацией инжектируемых зарядов. За квадратичным участком ВАХ следует область вертикального участка, который интерпретируется как область напряжений ($U_2=U_{1t}$), соответствующих предельному заполнению ловушек. Поскольку режим предельного заполнения ловушек является следствием существования квазиуровня Ферми в области расположения ловушечных состояний в запрещенной зоне, в образце резко возрастает количество инжектируемых зарядов, что приводит к значительному возрастанию силы тока. При дальнейшем повышении напряжения ВАХ описывается безловушечным квадратичным законом. Из вышеприведенного следует, что в случае инжекционной модели величина тока зависит от толщины образца при одинаковом напряжении, как $f(L^{-3})$.

Из данных, приведенных в Таблице, следует, что облучение при 30крад приводит к следующим изменениям параметров переноса заряда: уменьшается концентрация равновесных носителей, что, по-видимому, связано с изменением положения квазиуровня Ферми. Смещение значения напряжения U_1 в сторону уменьшения при облучении подтверждает наше предположение, что основную роль начинают играть глубокие ловушечные состояния, причем их концентрация растет. При этом наблюдается рост подвижности носителей заряда, что скорее всего можно объяснить увеличением концентрации ловушек и уменьшением степени их заполнения. Увеличение дозы облучения (до 800крад) приводит к распаду комплексов, образовавшихся в результате облучения при низких дозах (до 800крад), и при этом наблюдаются скопления точечных дефектов, приводящих к уменьшению концентрации дырок (Рис.2, кривая 5). Возникновение такого типа

нарушений наблюдалось при нейтронном облучении [7], а также в результате облучения быстрыми электронами [8].

Следует отметить, что при освещении образцов квадратичный ловушечный участок ВАХ постепенно перекрывается 1 и 3 участками в зависимости от интенсивности света. При больших интенсивностях света ВАХ состоит из одной линии с $n - 1$ (при $T=300K$), и условия ТООЗ не реализуются, что связано с увеличением концентрации свободных носителей. При низких температурах, при такой же интенсивности света опять реализуются условия ТООЗ и наклон кривых составляет $n=2$.

Таким образом, на основе анализа вольт-амперных характеристик облученных гамма квантами слоистых монокристаллов GaS показано, что механизм прохождения тока обусловлен монополярной инжекцией.

1. R.Fivaz, E Mooser, *Phys. Rev.* 3A, **136** (1964) 833.
2. Г.А.Абдуллаев, В.М.Салманов, *Взаимодействие лазерного злучения с полупроводниками A^3B^6* , (1979).
3. М.Ламперт, П.Марк, *Инжекционные токи в твердых телах*, (1973).
4. В.Н.Брудный, *Радиационные дефекты в полупроводниковых соединениях*, ФТП, **29** №8 (1986) 84.
5. А.Ш.Абдинов, *Электронные явления в неоднородных полупроводниках типа A^3B^6 со слоистой структурой*, Дисс.док. ф.м.н., (1978).
6. А.Ш.Абдинов, М.Г.Алиев, Н.М.Мехтиев, А.Г.Кязым-заде, *ФТТ*, **7** (1975) 1429.
7. В.В.Емцев, Т.В.Машовец, *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. Радио, М.* (1981) 185.
8. Г.Е.Давидюк, В.А.Оксюта, В.С.Банджара, *ФТТ*, **44** (2002) 246.

ŞÜALANMIŞ GaS MONOKRİSTALINDA İNJEKSİYA CƏRƏYANI

R.S.MƏDƏTOV, A.R.NƏCƏFOV, Ş.P.ŞƏKİLİ, T.B.TAĞIYEV

120÷350K temperaturda qamma şüaları ilə şüalandırılmış və şüalandırılmamış GaS laylı monokristalın c oxu istiqamətində VAX tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, bu yarımkeçiricilərdə cərəyanın axma mexanizmi həcmi yüklərlə əlaqədardır. Potensial çuxurunun hündürlüyü Fermi səviyyəsinə, tələlərin konsentrasiyası, sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası təyin edilmişdir.

INJECTION CURRENT IN THE IRRADIATED LAYERED MONOCRISTALS OF SULFIDE OF GALLIUM

R.S.MADATOV, A.R.NADJAFOV, SH.P.SHEKILI, T.B.TAGIYEV

VAKH of high-resistance gallium sulfide crystals in a range 120÷350K and also irradiated by gamma-quantum with a dose 30÷800krad in a direction perpendicularly the c axis have been investigated. The mechanism of passage of current in these semiconductors essentially has been defined by the temperature measurement. At rather high temperatures VAKH of researched samples submits to the theory a current limited to a volumetric charge.

Редактор: А.Гарибов