

Электролюминесценция и фототриггерный эффект в монокристаллах твердых растворов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$

© А.Г. Кязым-заде[¶], В.М. Салманов, А.Г. Мохтари, В.В. Дадашова, А.А. Агаева

Бакинский государственный университет,
370145 Баку, Азербайджан

(Получена 17 мая 2007 г. Принята к печати 12 октября 2007 г.)

Обнаружены и исследованы эффекты переключения и электролюминесценции, а также взаимосвязь между ними в монокристаллах твердых растворов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$. Установлено, что пороговое напряжение переключения зависит от температуры, удельного сопротивления и состава твердых растворов, а также от интенсивности и спектрального состава фотоактивного света. Вследствие этого наблюдается фототриггерный эффект под действием света из области собственного поглощения. В предпробойной области вольт-амперной характеристики наблюдается электролюминесценция, интенсивность которой скачком уменьшается до нуля при переключении образца из высокоомного состояния в низкоомное. Приводятся экспериментальные результаты, которые свидетельствуют об инжекционном механизме электролюминесценции и эффекта переключения, как это имеет место в других слоистых кристаллах типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$.

PACS: 78.60.Fi, 73.50.Fq, 72.80.Je, 84.32.Dd

1. Введение

Монокристаллы соединений типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$, в частности GaSe, GaS и твердые растворы на их основе, кристаллизуются в слоистой структуре [1]. Структура этих кристаллов состоит из последовательно упакованных слоев, каждый из которых содержит четыре плотно связанных атомных плоскостей В–А–А–В. Особенности таких структур являются сильная связь внутри слоев и очень слабая связь между слоями. Благодаря особенностям структуры и химических связей такие монокристаллы обладают уникальными физическими свойствами. Одним из значительно интересных и важных свойств указанных кристаллов является наблюдение в них быстродействующего эффекта переключения [2,3] и свечение под действием электрического поля — электролюминесценция [4–7], что важно для изготовления источников света с S-образной вольт-амперной характеристикой. Поскольку такие приборы совмещают в себе функции источника света и триггера и способны к быстродействию, они могут использоваться в качестве основных элементов оптоэлектронных устройств. В настоящее время подобные приборы изготавливаются на основе $p-i-n$, $p-n-p-n$, $p-n$ -структур из GaAs, GaP, $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ [8,9]. Однако из-за технологической трудности получения таких структур и практической невозможности осуществления их в целом ряде полупроводников, расширение круга материалов, применяемых для этой цели, а также диапазон излучения ограничены. Поэтому представляет интерес установление возможности сочетания эффекта переключения и электролюминесценции в рассматриваемых слоистых кристаллах и изготовления электролюминесцентных переключателей и фототриггеров на их основе.

Ранее в работах [10,11] сообщалось о возможности изготовления электролюминесцентных переключателей

и фототриггеров на основе кристаллов InSe, GaSe и GaS. В данной работе обнаружены и исследованы явления быстродействующего эффекта переключения и электролюминесценции, а также фототриггерный эффект в монокристаллах твердых растворов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ при низких температурах. Показана возможность совмещения этих явлений в одном и том же кристалле, что представляет интерес для создания многофункциональных оптоэлектронных приборов. Монокристаллы GaSe и GaS образуют непрерывный ряд твердых растворов, что способствует расширению функциональных возможностей соответствующих приборов на их основе.

2. Образцы и методика эксперимента

Исследованные монокристаллы твердых растворов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ выращивались методом медленного охлаждения при постоянном градиенте температур. Полученные кристаллы обладали проводимостью p -типа. Удельное сопротивление полученных кристаллов и концентрация дырок при комнатной температуре в зависимости от состава твердых растворов (атомной доли серы x) варьировались в интервале 10^5 – 10^9 Ом·см и 10^9 – 10^{13} см⁻³ соответственно. Измерения проводились в диапазоне температур 77–300 К. Образцы в виде прямоугольных параллелепипедов вырезались из крупных монокристаллов. Поперечные сечения образцов с толщиной 50–200 мкм варьировались в интервале 8–20 мм². Омические контакты были изготовлены припайванием индия или сделаны из эвтектического сплава In–Ga. Направление возбуждающего электрического поля было как параллельно, так и перпендикулярно оси кристалла c . Прикладывалось электрическое поле различного вида (постоянное, синусоидальное и прямоугольное импульсное). При изменении эффекта переключения использовался режим генератора тока. Освещение образцов осуществлялось излучением лампы накаливания,

[¶] E-mail: bsu_aydin@yahoo.com

прошедшим через монохроматор типа ЗМР-3, а также излучением второй гармоники неодимового лазера с энергией кванта 2.34 эВ, работающего в режиме модуляции добротности. Спектры излучения регистрировались фотоумножителями ФЭУ-17а и ФЭУ-22, область чувствительности которых охватывает интервал длин волн от 400 до 1000 нм.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований установлено, что свечение образцов наблюдается при прикладывании электрического поля как параллельно, так и перпендикулярно оси c . Спектр излучения не зависит от вида приложенного электрического поля. Когда ток протекает вдоль оси c , интенсивность излучения значительно больше, чем в перпендикулярном случае. Однако эффект переключения наблюдается лишь в том случае, когда ток протекает вдоль оси c . Поэтому далее приводятся экспериментальные результаты, которые получены в этом случае.

На рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов GaS_xSe_{1-x} в случае, когда ток протекает вдоль оси c . При относительно слабых полях ВАХ подчиняются закону Ома. Начиная с некоторой напряженности, линейность ВАХ нарушается и переходит в зависимость $I \propto U^n$, где $n = 2$. С ростом прикладываемого напряжения n увеличивается и получает значение 4–10 в различных кристаллах. При напряженностях электрического поля $E \approx 10^4 - 10^5$ В/см образцы скачком переходят из высокоомного состояния в низкоомное. При этом сопротивление образца уменьшается на несколько порядков величины и в низкоомном состоянии ток ограничивается нагрузочным сопротивлением. ВАХ исследуемых образцов являются строго симметричными. Аналогичные ВАХ наблюдаются во всех исследованных твердых растворах, причем в образцах с одинаковой

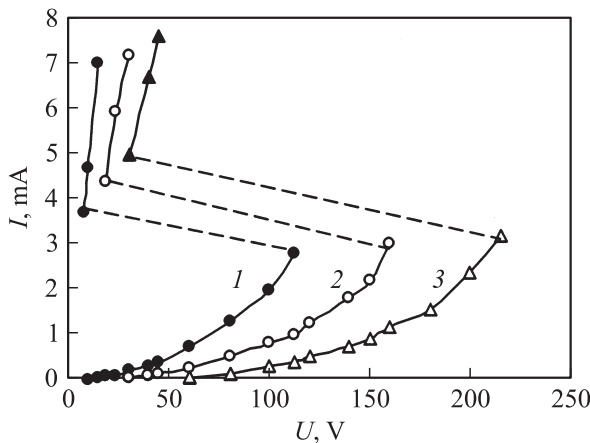


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики монокристаллов GaS_xSe_{1-x} при 77 К. Значения x : 1 — 0, 2 — 0.4, 3 — 0.8. $I \parallel c$.

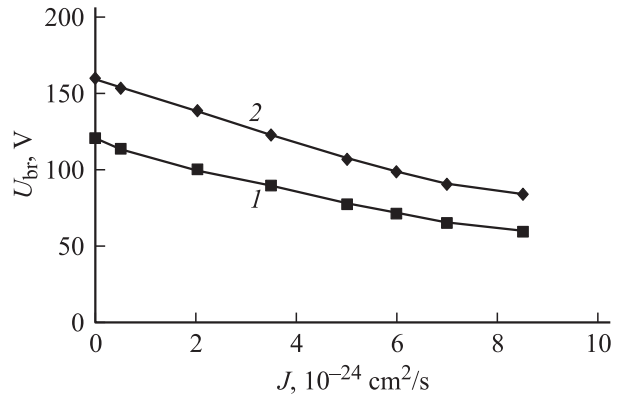


Рис. 2. Зависимости напряжения срыва U_{br} от интенсивности излучения лазерного света в монокристаллах $GaSe$ (1) и $GaS_{0.4}Se_{0.6}$ (2) при 77 К.

толщиной напряжение срыва увеличивается с ростом состава твердых растворов x . Кроме этого установлено, что напряжение срыва уменьшается с ростом температуры. При приложении синусоидального и прямоугольного импульсного поля напряжение срыва уменьшается с ростом частоты и длительности импульса. Переключение является запоминающимся и мгновенным. Время переключения, которое оценено в импульсном режиме, оказалось не больше чем $\sim 10^{-8}$ с. Исходное высокоомное состояние восстанавливается прикладыванием кратковременного импульса напряжения порядка напряжения срыва или нагреванием образца до комнатной температуры с последующим погружением в жидкий азот.

Интересным фактом является то, что напряжение срыва ВАХ U_{br} уменьшается под действием света из области фундаментального поглощения. На рис. 2 представлены зависимости напряжения срыва U_{br} от интенсивности излучения второй гармоники неодимового лазера с энергией кванта 2.34 эВ (J), работающего в режиме модуляции добротности. Как видно из рисунка, напряжение срыва в исследованных кристаллах уменьшается почти в 2 раза под действием света достаточно большой интенсивности. Благодаря этому в исследованных кристаллах наблюдается фототриггерный эффект под действием света из области собственного поглощения. Суть этого эффекта заключается в том, что если рабочая точка соответствует точке, близкой к точке переключения на темновой вольт-амперной характеристике, то включение света из области собственного поглощения с достаточной интенсивностью переводит структуры из высокоомного состояния в низкоомное, так как напряжение переключения уменьшается под действием собственного света. Установлено также, что в некоторых образцах имеет место фототриггерный эффект под действием света из области примесного поглощения, и структура переходит в более высокоомное состояние. По-видимому, это связано с явлением отрицательной фотопроводимости, индуцированной электрическим по-

лем, которое наблюдается в этих же структурах при относительно низких температурах [11].

Спектральное распределение напряжения переключения в области собственного поглощения совпадает со спектром фотопроводимости, а в области примесного поглощения — со спектром индуцированной электрическим полем отрицательной фотопроводимости.

Наблюдаемые экспериментальные факты свидетельствуют о том, что причиной эффекта переключения является двойная инжекция носителей заряда, как и в работах [2,3]. Первичный механизм возникновения эффекта переключения при этом связывается с термополевым опустошением мелких уровней, заполненных инжекцией. Известно, что из-за слабости межслойных связей в слоистых кристаллах указанного типа легко появляются в большом количестве дислокации и сдвиги, вследствие чего образуются локализованные состояния в запрещенной зоне. Из-за того что энергия этих состояний зависит от параметров сдвигов и дислокаций, можно предположить, что они распределены по всей запрещенной зоне, хотя в основном они будут сосредоточены вблизи валентной зоны. Их заполнение облегчается с ростом температуры или освещением из области собственного поглощения, а затрудняется под действием инфракрасной подсветки. При некоторой напряженности электрического поля, вследствие термополевого опустошения этих уровней, дырки переходят из локализованных состояний в нелокализованные. В результате образец переходит из высокоомного состояния в низкоомное. В дополнение к этому отметим, что, по нашему мнению, термополево опустошение этих уровней, а также их заполнение облегчается также благодаря наличию неоднородностей в реальных кристаллах указанных соединений в виде высокоомных включений в низкоомной матрице [12]. Вследствие этого ток в основном течет по узким каналам, т.е. имеется реальная возможность для шнурования тока. Природа памяти, по-видимому, связана со структурными изменениями (образованием металлической нити) в этом канале.

Экспериментально установлено, что электролюминесценция в исследованных кристаллах наблюдается лишь в нелинейной предпробойной области ВАХ. Для примера на рис. 3 представлены вольт-амперная (кривая 1) и вольт-яркостная (кривая 2) характеристики кристаллов $\text{GaS}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ при 77 К. Как видно из рисунка, с ростом приложенного напряжения интегральная интенсивность электролюминесценции растет. Рост яркости электролюминесценции продолжается до напряжения переключения. Когда образец переключается из высокоомного состояния в низкоомное, яркость электролюминесценции резко падает до нуля (рис. 3, кривая 2). В низкоомном состоянии на образце никакое излучение не появляется, несмотря на то что образец при этом обладает положительным дифференциальным сопротивлением. Такое скачкообразное уменьшение интенсивности электролюминесценции, по-видимому, связано с возникновением токовых шнуров в кристаллах при переключении. При

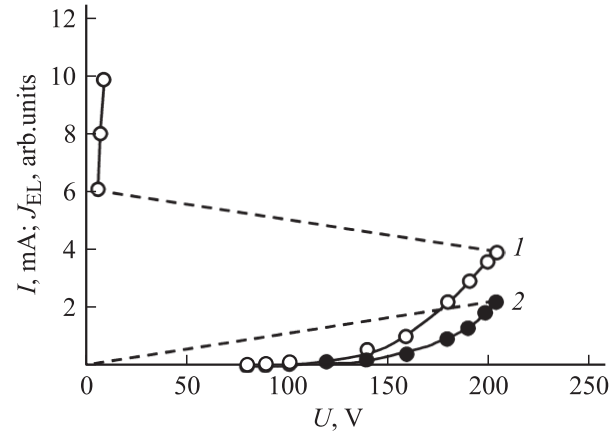


Рис. 3. Вольт-амперная (1) и вольт-яркостная (2) характеристики монокристаллов $\text{GaS}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ при 77 К.

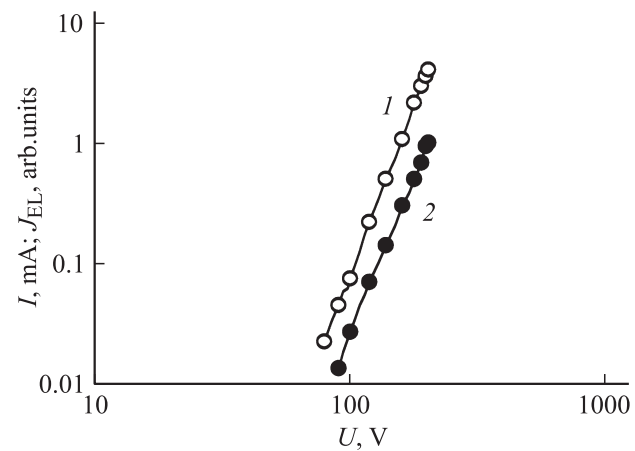


Рис. 4. Вольт-амперная (1) и вольт-яркостная (2) характеристики монокристаллов $\text{GaS}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ в предпробойной области вольт-амперной характеристики.

этом почти весь ток протекает по этим шнурам. Отсутствие излучения в токовом шнуре обусловлено термическим гашением электролюминесценции, так как большое значение тока в низкоомном состоянии приводит к выделению джоулева тепла в этом шнуре. В каждом образце переключение тока и электролюминесценции повторяется многократно. При этом значительного изменения в параметрах исследуемых элементов не происходит.

Спектры излучения изученных кристаллов охватывают широкую область длин волн от 460 до 1000 нм и хорошо согласуются с литературными данными [3–6]. В спектрах излучения монокристаллов GaSe наблюдается полоса излучения с максимумом в области $\lambda = 640$ нм, а в деформированных кристаллах наблюдается дополнительная полоса с максимумом $\lambda = 875$ нм. В кристаллах GaS наблюдаются полосы излучения с максимумами 482, 530 и 575 нм, а в спектрах излучения твердого раствора $\text{GaS}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ наблюдаются лишь полосы с максимумами 530 и 575 нм.

Для объяснения механизма возбуждения электролюминесценции снимались зависимости интегральной интенсивности электролюминесценции от прикладываемого к образцу напряжения и прошедшего через образец тока в предпробойной области ВАХ (рис. 4). С ростом приложенного напряжения интегральная интенсивность электролюминесценции растет по закону $J_{EL} \propto U^k$, где k не зависит от частоты, вида электрического поля и определяется только удельным сопротивлением образца. В исследованных образцах k изменяется в интервале 4–8. Зависимость яркости электролюминесценции от прошедшего через образец тока также соответствует степенному закону $J_{EL} \propto I^m$, где $m = 0.7–1$ в различных кристаллах. Наблюдаемые зависимости свидетельствуют об инжекционном механизме электролюминесценции, как это имеет место в других слоистых кристаллах типа $A^{III}B^{VI}$.

4. Заключение

Наблюдаемые особенности эффектов в твердых растворах показывают, что имеется некоторое сходство между исследуемым S -элементом и управляемым симметричным диодом-тиристором. Это делает возможным применение их в оптоэлектронике в качестве электролюминесцентного „тиристора“, управляемого светом и температурой. Поскольку излучение находится в видимой области спектра, эти элементы могут использоваться в матричных экранах и в цифровых индикаторах, где отображается информация.

Список литературы

- [1] Г.Л. Бельский, В.Б. Стопачинский. УФН, **140** (2), 233 (1983).
- [2] G.A. Akhundov, A.Sh. Abdinov, N.M. Mekhtiev. Phys. Status Solidi A, **15**, K33 (1973).
- [3] Г.А. Ахундов, А.Ш. Абдинов, Н.М. Мехтиев, А.Г. Кязымзаде. ФТП, **7**, 1830 (1973).
- [4] Г.А. Ахундов, И.Г. Аксянов, А.Г. Багиров. Опт. и спектр., **21**, 120 (1966).
- [5] Г.А. Ахундов, И.Г. Аксянов, Г.М. Касымов. ФТП, **3**, 912 (1969).
- [6] М.Н. Караман, В.П. Мушинский. ФТП, **4**, 785 (1970).
- [7] A. Mercier, E. Mooser, J. Voitsky. J. Luminesc., **7**, 241 (1973).
- [8] P.R. Selway, W.M. Nicolle. J. Appl. Phys., **40**, 4087 (1969).
- [9] R. Kayers, K. Weiser. Pat. USA, 317-234, N-3440497, 22.04 (1969); W.I. Ingsamuel, H.A. Jensen, B.I. Stern. Pat. USA, 317-234, 6.05 (1969).
- [10] Г.А. Ахундов, А.Ш. Абдинов, А.Г. Кязымзаде, Н.М. Мехтиев. ФТП, **9**, 980 (1975).
- [11] А.Ш. Абдинов, Я.Г. Акперов, В.К. Мамедов, Л.Ю. Салаев. ФТП, **14**, 749 (1980).
- [12] А.Ш. Абдинов, А.Г. Кязымзаде. ФТП, **9**, 2135 (1975).

Редактор Т.А. Полянская

Electroluminescence and the photo-trigger effect in monocrystals of GaS_xSe_{1-x} solid-solutions

A.G. Kyzym-Zade, V.M. Salmanov, A.H. Moktary, V.V. Dadashova, A.A. Agaeva

Baku State University,
370145 Baku, Azerbaijan

Abstract Effect of switching and electroluminescence, and also interrelation between them in monocrystals of solid-solutions GaS_xSe_{1-x} have been found out and investigated. It has been established, that the threshold voltage of switching depends on temperature, from specific resistance and composition (x) of solid-solutions, and also from intensity and spectral composition of photoactive light. Therefore the photo-trigger effect under action of light from area of fundamental absorption was observed. In pre-breakdown areas of current-voltage characteristics the electroluminescence, which intensity is observed by jump decreases up to zero at switching a sample from a high-resistance condition into low-resistance. Experimental results which testify to the injection mechanism of an electroluminescence and effect of switching as it takes place in other layered crystals such as $A^{III}B^{VI}$ are resulted.