

ВЛИЯНИЕ γ - ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ $TlInS_2$ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ

Р.С.МАДАТОВ, А.И.НАДЖАФОВ, В.С.МАМЕДОВ, М.А.МАМЕДОВ

*Институт Радиационных Проблем НАНА
AZ 1143, г.Баку, пр.Ф.Агаева, 9*

Впервые проведены исследования анизотропии электропроводимости в кристаллах $TlInS_2$ гексагональной модификации (ГМ), облученных γ -квантами. Установлено, что при облучении, начиная с некоторой дозы, в кристаллах происходит накопление радиационных дефектов вдоль всех кристаллографических направлений. В результате этого уменьшается электропроводность $\sigma_{\perp c}$ и $\sigma_{\parallel c}$. При увеличении дозы облучения вследствие взаимодействия радиационных дефектов с исходными неоднородностями происходит образование сложных дефектов, в результате чего значение электропроводности экспоненциально увеличивается в обоих направлениях. Предположено, что уменьшение электропроводности $\sigma_{\perp c}$ при малых дозах связано с частичной компенсацией исходного уровня донорного типа. Облучение большими дозами n- $TlInS_2$ (выше 200 крад) приводит к образованию скоплений радиационных дефектов и сильной компенсации материала.

ВВЕДЕНИЕ

Структура соединения $TlInS_2$ ГМ модификации аналогична структуре молибденита MoS_2 . Однако в отличие от этой структуры, где атомы Мо находятся в тригональных призмах и октаэдры между этими призмами являются пустыми, в структуре ГМ - $TlInS_2$ тригональные призмы заполнены атомами Тl, а октаэдры - атомами In [1]. Структура $TlInS_2$ ГМ изначально является дефектной. В этой связи характерной особенностью кристаллов ГМ- $TlInS_2$ является их способность к образованию дефектов упаковки, которые сильно влияют на электропроводность этих кристаллов [2-4]. По всей видимости такая высокая концентрация собственных дефектов обусловлена сильной анизотропией сил связей в таких структурах, которая способствует возникновению многочисленных дефектов, вакансий и дислокаций. Это приводит к нарушению трансляционной инвариантности кристаллической структуры и возникновению локализованных состояний в запрещенной зоне кристалла. Влияние дефектов упаковки на электрические свойства кристаллов, а также взаимодействие этих дефектов с радиационными дефектами до настоящего времени не исследованы.

В данной работе приводятся результаты исследований анизотропии электропроводности облученных γ -квантами кристаллов $TlInS_2$ гексагональной модификации.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследований были выращены монокристаллы $TlInS_2$ ГМ путем отжига монокристаллов моноклинной модификации при $T=650K$ в течение 30 дней. Полученные кристаллы имели n-тип проводимости и обладали удельным сопротивлением $(1\div 6)10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Параметры элементарной ячейки полученных кристаллов имели следующие значения: $a=3.82\text{ \AA}$, $c=14.85\text{ \AA}$. Анизотропия электропроводности $\sigma_{\parallel c}/\sigma_{\perp c}$ ($\sigma_{\parallel c}$ и $\sigma_{\perp c}$ - электропроводность кристаллов в направлениях параллельном и перпендикулярном оси „с”, соответственно) и её температурная зависимость при различных приложенных напряжениях была измерена четырехзондовым методом [5]. Контакты из индия на образцах находились попарно друг против друга. Специальная система масок позволяла совмещать две пары контактов и контролировать размеры нанесенных контактов и расстояние между ними с точностью до 0,01мм. Точность совмещения

индиевых контактов с диаметрами 0,5мм и расстоянием между ними 2 мм по обеим сторонам плоскопараллельного образца была необходима для устранения дополнительных сигналов при электрометрических измерениях из-за неэквипотенциальности. Облучение образцов γ -квантами осуществлялось на установке Co^{60} при комнатной температуре. Кристаллы при облучении охлаждались парами жидкого азота и их температура не поднималась выше 290К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис.1 и Рис.2 представлены температурные зависимости электропроводности кристаллов $TlInS_2$ ГМ, облученных γ -квантами в направлениях $\sigma_{\perp c}$ и $\sigma_{\parallel c}$ при 300К. Как видно из Рис.1(кр.1), электропроводность необлученных кристаллов в направлении $\sigma_{\perp c}$ в области температур 210÷220К имеет глубокий минимум с энергией $E+0,49эВ$ и при дальнейшем уменьшении температуры претерпевает экспоненциальный рост. При облучении образцов дозами 50 и 100крад наблюдается увеличение значений электропроводности, характер зависимости сохраняется, но при этом наблюдается смещение минимума в сторону высоких температур ($T \rightarrow 250К$), при этом его глубина и ширина уменьшаются (кр.2 и 3). Из Рис.2 также видно, что на кривой зависимости $\sigma_{\parallel c}(T)$ наблюдается минимум в области температур 180÷190К, который также смещается в сторону высоких температур, его глубина и ширина уменьшаются с ростом дозы облучения. Анализ температурной зависимости электропроводности показал, что согласно данным [6] в кристаллах $TlInS_2$ моноклинной модификации различие механизмов проводимости в различных кристаллических направлениях обусловлено влиянием неконтролируемых примесей, осаждающихся на дефектах упаковки. Это вероятнее всего служит причиной уменьшения анизотропии электропроводности во всем температурном интервале по мере увеличения дозы облучения.

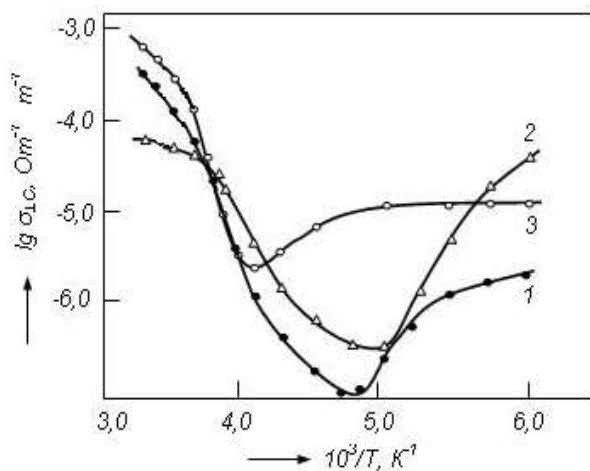


Рис.1.

Зависимость удельной электропроводности необлученных и облученных γ -квантами ГМ- $TlInS_2$ в направлении перпендикулярном оси „с” от температуры: 1- необлученный, 2- $D=50$ крад, 3- $D=100$ крад.

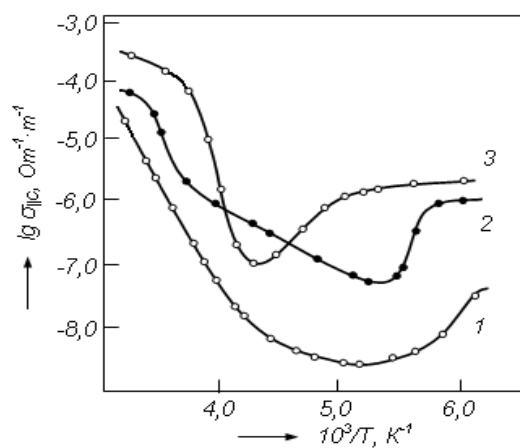
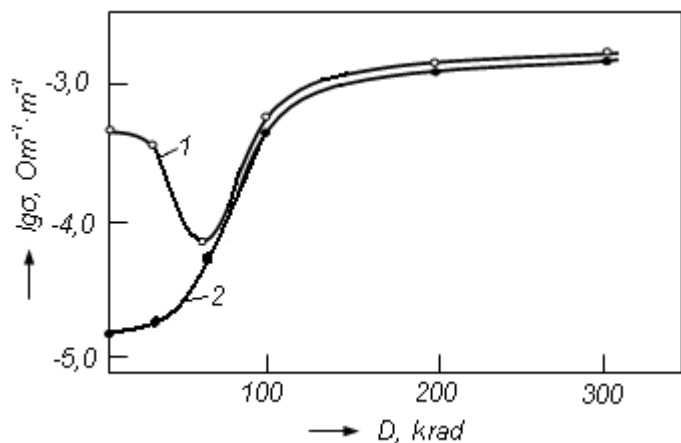


Рис.2.

Зависимость удельной электропроводности необлученных и облученных γ -квантами ГМ- $TlInS_2$ в направлении параллельном оси „с” от температуры: 1- не облученный, 2- $D=50$ крад, 3- $D=100$ крад.

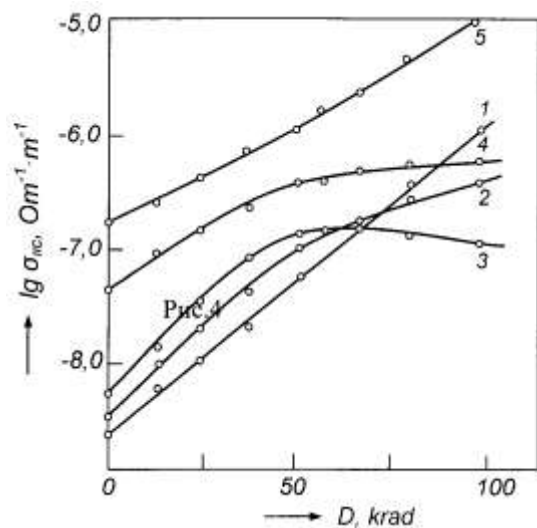
На Рис.3 приведены зависимости $\sigma_{\perp c}$ и $\sigma_{\parallel c}$ от дозы облучения при комнатной температуре. Как видно из Рис.3, при дозах до 30крад электропроводность кристаллов незначительно изменяется в обоих направлениях. При дозах облучения в интервале 30÷120крад (Рис.3.кр.1) $\sigma_{\perp c} \sim f(D)$, проходя через минимум,

резко возрастает, в дальнейшем с ростом дозы облучения наблюдается незначительный рост электропроводности. Следует отметить, что в интервале $30 \div 120$ крад электропроводность в направлении, параллельном оси „с”, $\sigma_{\parallel c}$ экспоненциально растет, и далее характер зависимости $\sigma_{\parallel c} \sim f(D)$ повторяется и в случае $\sigma_{\perp c} \sim f(D)$. Сравнение кривых 1 и 2 (Рис.3) показало, что при облучении малыми дозами нелегированного n-TlInS₂ вводятся радиационные дефекты типа собственного акцепторного дефекта в объеме кристалла. Полагаем, что уменьшение электропроводности при малых дозах в случае $\sigma_{\perp c}$ связано с частичной компенсацией исходного уровня донорного типа. Облучение большими дозами n-TlInS₂ (более 200 крад) приводит к образованию скоплений радиационных дефектов и сильной компенсации материала.

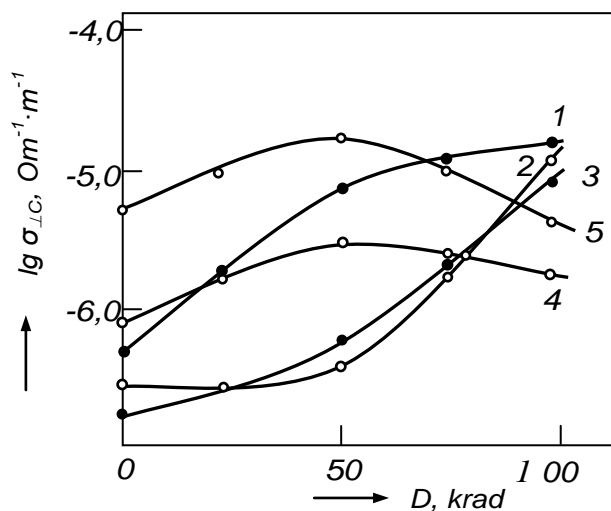
**Рис.3.**

Зависимость удельной электропроводности (при $T=293K$) ГМ-TlInS₂ от дозы облучения; 1 - в направлении перпендикулярном оси „с”, 2 - в направлении параллельном оси „с”.

На Рис.4 и Рис.5 представлены зависимости анизотропии электропроводности $\sigma_{\perp c}$ и $\sigma_{\parallel c}$ от дозы облучения для нелегированного образца TlInS₂ при различных температурах. Из Рис.4 (кривая 1) видно, что в облученных образцах (до 50 крад) при различных температурах характер зависимости $\sigma_{\parallel c} \sim f(D)$ незначительно изменяется, т.к. электропроводность образцов увеличивается во всей области исследованных температур. При облучении образцов большими дозами (более 50 крад) характер температурной зависимости электропроводности с ростом дозы облучения сильно изменяется.

**Рис.4.**

Зависимость удельной электропроводности в направлении оси параллельным „с” при различных температурах ГМ-TlInS₂ от дозы облучения. 1-181К, 2-198К, 3-208К, 4-233К, 5-248К.

**Рис.5.**

Зависимость удельной электропроводности в направлении перпендикулярным оси „с” при различных температурах ГМ-TlInS₂ от дозы облучения. 1-181К, 2-198К, 3-208К, 4-233К, 5-248К.

Из кривых 1, 2 и 3 Рис.4 видно, что зависимость $\sigma_{\parallel C} \sim f(D)$ при высоких дозах облучения имела тенденции к насыщению, а наклон кривых 4 и 5 уменьшается с ростом дозы γ -квантов. Следует отметить, что электропроводность кристаллов, облученных малыми дозами (до 50рад), в направлении $\sigma_{\perp C}$ в области температур 180÷248К обладает таким же ходом (Рис.5 кр.1-5), как в случае $\sigma_{\parallel C} \sim f(D)$. Однако при облучении большими дозами (более 50крад) наблюдается иной характер изменения электропроводности в направлении $\sigma_{\perp C}$. Из Рис.5 видно, что наклон кривых, снятых при различных температурах, имеет различных ход изменения с ростом дозы γ -квантов. Как видно из кривых 1-5 (Рис.5), электропроводность в направлении $\sigma_{\perp C}$ уменьшается при $T=233K$ (кр.2-4) с ростом дозы облучения, а при температурах 181К и 248К - монотонно увеличивается. Исследования дозовой зависимости анизотропии электропроводности $\sigma_{\parallel C} / \sigma_{\perp C}$ в $TlInS_2$ (Рис.6, крив.2-4) показали, что анизотропия электропроводности при дозе облучения 100крад уменьшается в 1,5 раза. Обнаружено, что для облученного $TlInS_2$ концентрацией $n \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (кр.2) при $T > 250K$ анизотропии электропроводности $\sigma_{\parallel C} / \sigma_{\perp C}$ не наблюдается, в области 250÷220К с уменьшением температуры сильно увеличивается, а при $T < 220K$ наблюдается слабая зависимость $\sigma_{\parallel C} / \sigma_{\perp C}$. С ростом дозы облучения более 200крад характер температурной зависимости анизотропии электропроводности, представленной на Рис.4, сильно изменяется (крив.2,3) и при высоких дозах характер изменения $\sigma_{\parallel C} / \sigma_{\perp C}$ от температуры приобретает форму, подобную для необлученных образцов (крив.4).

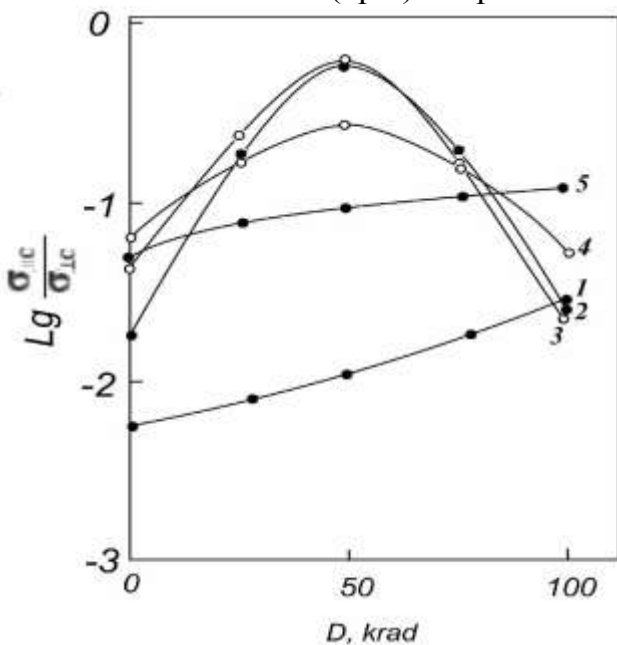


Рис.6. Зависимость отношения $\sigma_{\parallel C} / \sigma_{\perp C}$ при различных температурах ГМ- $TlInS_2$ от дозы облучения, 1-181К, 2-198К, 3-208К, 4- 233К, 5-248К.

Рис.6.

Зависимость отношения $\sigma_{\parallel C} / \sigma_{\perp C}$ при различных температурах ГМ- $TlInS_2$ от дозы облучения, 1-181К, 2-198К, 3-208К, 4- 233К, 5-248К.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изложенные выше экспериментальные результаты не могут быть объяснены на основе только теоретического рассмотрения процессов переноса [7] с использованием модельного закона дисперсии для продольного слоистого кристалла. Для объяснения полученных экспериментальных данных измерений анизотропии электропроводности в $TlInS_2$ примем модель „двухмерного и трехмерного“ дефекта [7].

Согласно этой модели дефекты, скопленные в разных кристаллических направлениях, могут существенно ограничивать $\mu_{\parallel C}$ при слабом изменении $\mu_{\perp C}$ ($\mu_{\parallel C}$ и $\mu_{\perp C}$ подвижности в направлениях параллельном и перпендикулярном оси „с“, соответственно). Влияние таких дефектов можно феноменологически описать, используя понятие края подвижности вдоль оси с [8]. Тогда проводимость определяется как $\sigma_{\perp C} = e\mu_{\perp C} \exp(-\Delta E/kT)$, и выражение для анизотропии можно записать в виде

$$\sigma_{\perp C} / \sigma_{\parallel C} = \left[\mu_{\perp C} / \mu_{\parallel C} \right] \exp(\Delta E/kT) ,$$

где ΔE - энергетический межслоевой барьер. Сравнение полученных данных для $TlInS_2$ указывает на взаимосвязь значений анизотропии электропроводности и энергии барьеров со степенью структурного совершенства кристаллов. Это свидетельствует о том, что по мере облучения концентрация доноров падает. Очевидно, что в результате этого зафиксировано уменьшение $\sigma_{||C}/\sigma_{\perp C}$ при облучении (Рис.1 и 2). Уменьшение анизотропии электропроводности $\sigma_{||C}/\sigma_{\perp C}$ в $TlInS_2$ имеет место вследствие преобладающего роста $\sigma_{\perp C}$ по сравнению с изменениями электропроводности $\sigma_{||C}/\sigma_{\perp C}$ вдоль ($\sigma_{\perp C}$). Согласно этому механизму, анизотропия электропроводности в области $T > 100K$ обусловлена более сильной температурной зависимостью холловской подвижности по сравнению с временем жизни носителей [8].

Действительно, полученные результаты свидетельствуют о том, что различие механизмов проводимости в разных кристаллических направлениях обусловлено влиянием неконтролируемых примесей, осаждающихся на дефектах упаковки кристаллов $TlInS_2$. Указанный характер изменения электропроводности кристаллов n- $TlInS_2$ свидетельствует об образовании при облучении в запрещенной зоне $TlInS_2$ непрерывного ряда глубоких акцепторных уровней, принимающих на себя часть электронов. При дальнейшем облучении характер зависимости $\sigma_{||C}/\sigma_{\perp C} \sim f(T)$ изменяется (Рис.1, Рис.2, Рис.4 и Рис.5). Это связано с тем, что длительное облучение смещает уровень Ферми ближе к середине запрещенной зоны, радиационные уровни, созданные облучением, оказываются при этом выше уровня Ферми. Поэтому при повышении температуры электропроводность растет за счет увеличения концентрации электронов в зоне проводимости. Это и служит причиной уменьшения анизотропии электропроводности во всем температурном интервале по мере увеличения дозы облучения. Уменьшение $\sigma_{||C}/\sigma_{\perp C}$ при облучении происходит вследствие преобладающего роста $\sigma_{||C}$ по сравнению с изменениями электропроводности $\sigma_{\perp C}$. Это означает, что накопление неконтролируемых примесей на межслойных дефектах приводит к искривлению дна зоны проводимости и образованию потенциальных ям для носителей заряда. Увеличение количества дефектов приводит к разупорядочению в расположении слоев и, тем самым, способствует росту межслоевого барьера. Широкий диапазон значений анизотропии обусловлен присутствием неконтролируемых примесей, которые, осаждаясь на дефектах упаковки, вносят разупорядочение вдоль оси „с“. Дислокация таких примесных включений при термообработке способствует проявлению трехмерного характера с зоны кристаллов $TlInS_2$.

Полученные результаты, в частности спад $\sigma_{||C}$ и $\sigma_{\perp C}$ при малых дозах облучения, свидетельствуют о том, что, начиная с некоторой дозы, зависящей от исходной концентрации примесей, происходит накопление радиационных дефектов в различных кристаллографических направлениях. В результате этого уменьшается подвижность основных носителей и, следовательно, электропроводности $\sigma_{\perp C}$ (Рис.3). При увеличении дозы облучения вследствие взаимодействия радиационных дефектов с исходными неоднородностями происходит образование сложных дефектов, в результате чего подвижность носителей ($\mu_{\perp C}$) уменьшается в несколько раз [9]. Результаты исследований анизотропии кристаллов при комнатной температуре показали, что при низких дозах происходит частичная компенсация, а при высоких дозах (более 200крад) - полная компенсация, в результате чего $\sigma_{\perp C}$ и $\sigma_{||C}$ остаются не измененными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе впервые показано, что облучение кристаллов n - $TlInS_2$ гексагональной модификации γ -квантами приводит к существенному изменению их электрических свойств, создавая в запрещенной зоне кристалла как простые, так и более сложные радиационные дефекты. Установлено, что при малых дозах облучения происходит накопление радиационных дефектов в кристалле. В результате этого уменьшается электропроводность $\sigma_{\perp C}$ и $\sigma_{\parallel C}$, что связано с частичной компенсацией исходного уровня донорного типа. При увеличении дозы облучения вследствие взаимодействия радиационных дефектов с исходными неоднородностями происходит образование сложных дефектов, в результате чего электропроводность в обоих направлениях экспоненциально увеличивается. Облучение большими дозами n - $TlInS_2$ (выше 200крад) приводит к образованию скоплений радиационных дефектов и сильной компенсации материала, что приводит к увеличению радиационной стойкости материала.

1. К.А.Агаев, В.А.Гасымов, М.И.Чирагов, *Кристаллография*, **18** (1973) 366.
2. К.К.Mamedov, A.M.Abdullaev, E.M.Kerimova, *Phys. Stat. Sol.(a)*, **94** (1986) 115.
3. С.Н.Алиев, А.И.Наджафов, О.А.Алекперов, Из. АН СССР, *Неорган. Материалы*, **27** (1991) 621
4. О.А.Алекперов, А.И.Наджафов, *Неорган. Материалы*, **40** (2004) 1423.
5. В.Ф.Лысов, *Практикум по физике полупроводников*, М.Просвещение, (1976) 207.
6. А.У.Шелег, К.В.Иодковская, С.В.Родин, В.А.Алиев, *ФТТ*, **39** (1997) 1088.
7. С.Н.Мустафаева, В.А.Алиев, М.М. Асадов, *ФТТ*, **40** (1996) 612.
8. А.Роуз, *Основы теории фотопроводимости. Издательство „Мир” Москва*, (1966) 192.
9. Л.С.Смирнова, *Физические процессы в облученных полупроводниках, Издательство „Наука” Новосибирск*, (1977) 256 .

HEKSAQONAL MODİFİKASİYALI $TlInS_2$ KRİSTALLARIN
ELEKTRİK KEÇİRİCİLİYİNƏ γ -ŞÜALARIN TƏSİRİ

R.S.MƏDƏTOV, A.İ.NƏCƏFOV, V.S.MƏMMƏDOV, M.Ə.MƏMMƏDOV

İlk dəfə olaraq γ -şüalarla şüalandırılmış $TlInS_2$ kristallarının hekşaonal modifikasiyasının elektrik keçiriciliyinin anizotropiyası araşdırılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, şüalanma zamanı müəyyən dozadan başlayaraq bütün kristalloqrafik istiqamətlər boyunca radioaktiv defektlərin yığılması baş verir. Bunun nəticəsində elektrik keçiricilikləri $\sigma_{\parallel C}$ və $\sigma_{\perp C}$ azalır. Şüalanma dozası artdıqda ilkin qeyri bircinsliklərlə radioaktiv defektlərin qarşılıqlı təsiri nəticəsində mürəkkəb defektlər yaranır. Bunun nəticəsində elektrik keçiriciliyinin qiyməti hər iki istiqamətdə eksponensial artır.

INFLUENCE OF γ -RADIATION ON ELECTROCONDUCTIVITY OF HEXAQONAL
CRYSTALS $TlInS_2$

R.S.MADATOV, A.I.NACAFOV, V.S.MAMMADOV, M.A.MAMMADOV

Researches of anisotropy of electroconductivity have been carried out in hexagonal crystals $TlInS_2$ (H'M), irradiated by γ -quanta. It has been established that at an irradiation, since some dose, in crystals there has been an accumulation of radiation defects along all crystal directions. As a result the electroconductivity $\sigma_{\perp C}$ and $\sigma_{\parallel C}$ has been decreased. At increase in a dose of an irradiation, owing to interaction of radiation defects with initial nonuniformity, there has been a formation of difficult defects therefore value of electroconductivity increases in both directions

Редактор: Т.Мамедов