

## ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ, НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА $p$ -CdTe

Байдуллаева А., Булах Б. М., Даулетмуратов Б. К., Джумаев Б. Р., Корсунская Н. Е., Мозоль П. Е., Гарягдыев Г.

Исследовано влияние наносекундных импульсов излучения рубинового лазера с плотностью мощности ниже порогов плавления, возгонки и разрушения на плотность дислокаций, электрические, фотоэлектрические и люминесцентные свойства кристаллов  $p$ -CdTe. Показано, что уменьшение проводимости кристаллов после лазерного облучения сопровождается уменьшением величины фототока и интенсивности фотолюминесценции и обусловлено размножениями дислокаций и стеканием на них акцепторов  $\text{Li}_{\text{Cd}}$  и  $\text{Na}_{\text{Cd}}$  из объема.

Исследованию влияния лазерного излучения на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства полупроводников  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  посвящено большое число работ, что связано как с практическими возможностями использования лазеров в технологии, так и с необходимостью выяснения причин деградации полупроводниковых лазеров.

Однако почти во всех работах использовались большие плотности мощности излучения, когда происходит плавление или возгонка полупроводника. В то же время влияние лазерного излучения с плотностью мощности ниже порогов плавления, возгонки и разрушения  $P_{\text{n}}$  на свойства полупроводников  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  практически не исследовалось, хотя такое влияние следует ожидать вследствие способности этих полупроводников изменять характеристики под действием даже обычного света и ультразвуковых волн — факторов, порождаемых и лазерным излучением. Поэтому в настоящей работе исследовалось влияние наносекундных импульсов излучения рубинового лазера с плотностью мощности  $P < P_{\text{n}}$  на плотность дислокаций, электрические, фотоэлектрические и люминесцентные свойства кристаллов CdTe.

Использовались специально не легированные пластинчатые кристаллы CdTe  $p$ -типа, полученные методом синтеза из паров исходных элементов [1], толщиной 100 мкм. На поверхность большой грани наносились электроды химическим осаждением меди.

Фотолюминесценция (ФЛ) при 80 и 4.2 К возбуждалась излучением He—Ne-лазера и регистрировалась с помощью монохроматора МДР-23.

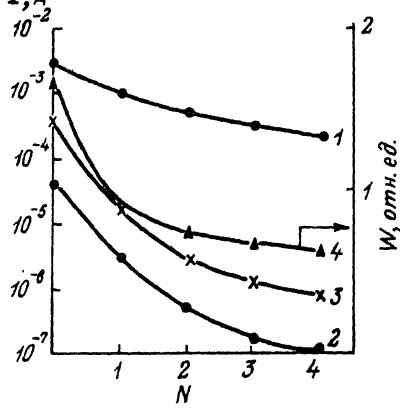
Плотность дислокаций определялась по ямкам травления методом оптической микроскопии.

Облучение проводилось одиночными наносекундными импульсами излучения рубинового лазера при 300 К.

Оказалось, что изменение характеристик кристаллов начинает наблюдаться при достижении плотности мощности  $P \approx 2 \text{ МВт/см}^2$ . При этом образования пленки теллура, которое наблюдалось в работах [2, 3], еще не происходит [4].

Рис. 1. Зависимости темнового тока ( $I$ , 2), фототока (3) и фотолюминесценции (4) от числа импульсов при  $P = 2 \text{ МВт/см}^2$ .

1 — при 300, 2—4 — при 80 К.



## Проводимость

Облучение исследуемых кристаллов излучением с  $P \approx 2 \text{ МВт/см}^2$  приводит к уменьшению равновесного тока  $I_T$ , причем он продолжает уменьшаться в течение  $\sim 2$  ч и после прекращения лазерного импульса. С увеличением числа импульсов  $N$  величина  $I_T$  как при 300, так и при 80 К уменьшается, а затем стремится к насыщению (рис. 1). Для достижения стационарного значения  $I_T$  измерения проводились через 2 ч после облучения.

## Фотопроводимость

Спектры фототока  $I_\Phi$  при 300 и 80 К содержат, как правило, один зона-зонный максимум. После облучения вид спектра не изменяется, а величина  $I_\Phi$  уменьшается, причем изменения  $I_\Phi$  коррелируют с изменениями  $I_T$  (рис. 1).

## Фотолюминесценция

На рис. 2 приведены спектры ФЛ при 80 (а) и 4.2 К (б) одного из кристаллов до (кривая 1) и после (кривые 2—4) облучения различным числом лазерных импульсов. Измерения ФЛ, как и  $I_T$ , проводились после выдерживания образца после облучения в течение 2 ч при 300 К.

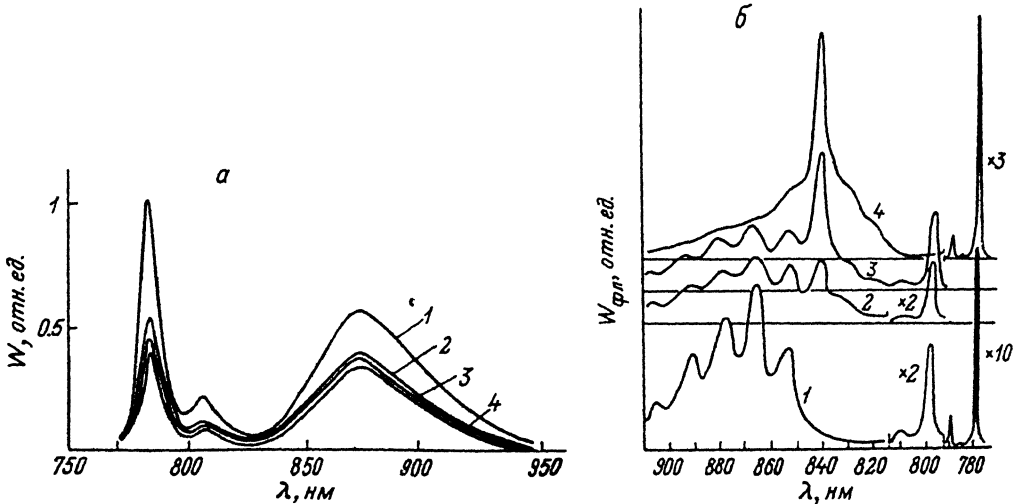
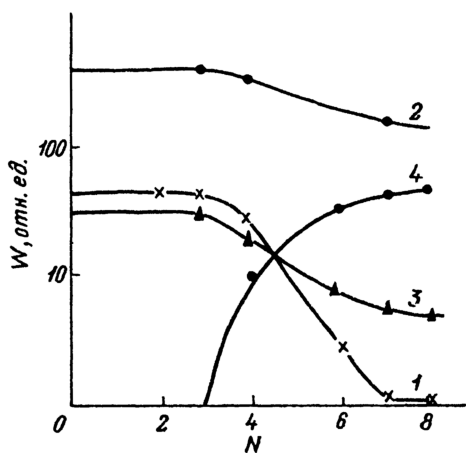


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции при 80 (а) и 4.2 К (б).

1 — исходный, 2—4 — после облучения соответственно двумя—четырьмя импульсами с плотностью мощности излучения  $P = 2 \text{ МВт/см}^2$ .

Рис. 3. Зависимости интенсивностей полос фотолюминесценции от числа импульсов при  $P = 2 \text{ МВт/см}^2$ . Полосы с длинами волн, нм: 1 — 800, 2 — 780, 3 — 865, 4 — 840.



Спектры ФЛ при 80 К до облучения содержат линию излучения свободных экситонов, полосу 806 нм и полосу в области 850—950 нм. При 4.2 К в спектре ФЛ наблюдаются линия экситонов, связанных на нейтральных акцепторах ( $\lambda = 780 \text{ нм}$ ), краевая полоса (800—810 нм) и полоса в области 850—950 нм. Облучение приводит к уменьшению интенсивности всей ФЛ при 80 К. При 4.2 К интенсивность  $W$  исходных полос также уменьшается, но при этом наблюдается появление новой полосы  $\lambda = 840 \text{ нм}$ .

Существенно, что начало гашения исходных полос ФЛ и появление новой полосы происходят при одной и той же дозе облучения (рис. 3). При увеличении числа импульсов  $N$  интенсивность полосы 840 нм продолжает возрастать, а исходных полос уменьшаться, причем интенсивность краевой полосы уменьшается сильнее, чем остальных полос (рис. 3). При  $N = 8 \div 10$  интенсивность всех полос стремится к насыщению.

### Плотность дислокаций

Плотность дислокаций на необлученных кристаллах составляла  $\sim 10^2 \text{ см}^2$ . Облучение не приводило к появлению очевидных разрушений поверхности кристаллов. Однако после селективного травления наблюдалось увеличение количества дислокационных ямок травления, причем оно возрастало с ростом дозы облучения (рис. 4). Отметим, что эта пороговая доза облучения, при которой наблюдается размножение дислокаций, соответствует порогу изменения других характеристик: ФЛ и  $I_T$ .

При послыном травлении кристалла плотность дислокаций уменьшается и на глубине 3—5 мкм возвращается к исходному значению.

### Обсуждение результатов

Как отмечалось выше, уменьшение проводимости кристаллов сопровождается уменьшением величины фототока и интенсивности исходных полос ФЛ. Corre-

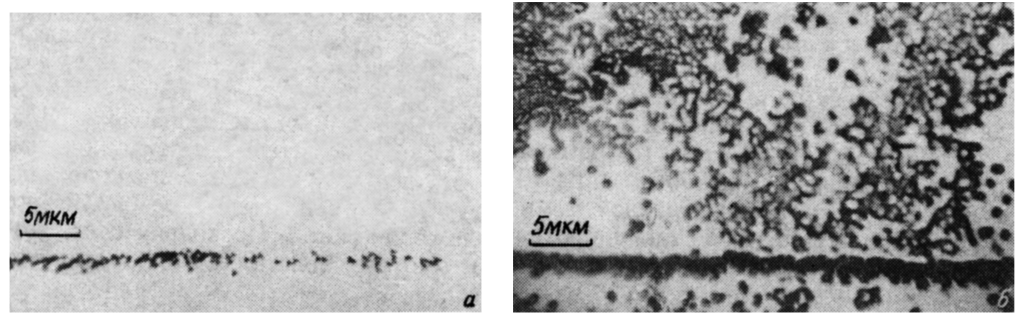


Рис. 4. Микроскопия поверхности кристаллов  $p\text{-CdTe}$  до (а) и после (б) облучения.

ляция между изменениями интенсивности ФЛ при 80 К и величины  $I_T$  (рис. 1) свидетельствует о том, что изменения  $I_T$  связаны с контактными явлениями и изменением подвижности, а обусловлены изменением концентрации свободных дырок. При этом одновременное уменьшение  $I_{\phi}$  и  $W$ , по крайней мере при 80 К, можно объяснить изменением степени заполнения центров рекомбинации при возбуждении в результате изменения положения уровня Ферми [5]. В самом деле, поскольку в кристаллах имеются центры прилипания основных носителей, их заполнение приводит к накоплению носителей противоположного знака на центрах рекомбинации, т. е. к формированию квазитемнового заполнения последних неосновными носителями  $N_r^0$ . Уменьшение концентрации равновесных носителей приводит к увеличению концентрации пустых центров прилипания основных носителей и, следовательно, к росту  $N_r^0$ , что в свою очередь вызывает уменьшение  $\tau$  ( $\tau \sim \frac{1}{N_r^0}$ ). При этом увеличение  $N_r^0$  может привести и к уменьшению

потока неравновесных носителей на центры рекомбинации и, следовательно, интенсивности люминесценции [5].

Как отмечалось выше, уменьшение  $I_T$  сопровождается увеличением плотности дислокаций, на что указывают как появление полосы  $\lambda = 840$  нм, связанной с рекомбинацией носителей на протяженных дефектах типа дислокационной петли [6], так и непосредственно микроскопические исследования. Как было показано в [7], в кристаллах CdTe  $p$ -типа имеется взаимосвязь между величиной проводимости и плотностью дислокаций  $\gamma$ : в кристаллах с большей  $\gamma$  проводимость меньше. Поэтому можно предположить, что уменьшение проводимости при лазерном облучении связано с увеличением плотности дислокаций.

Уменьшение  $I_T$  с ростом  $\gamma$ , естественно, объясняется тем, что дислокации являются стоками для дефектов акцепторного типа, определяющими величину  $I_T$ . При малой величине  $\gamma$  значительная концентрация этих дефектов  $N_a$  остается не захваченной дислокациями и с ростом  $\gamma$  должна уменьшаться. Об уменьшении концентрации акцепторов свидетельствуют изменения в спектрах ФЛ. Как видно из рис. 3, наряду с общим уменьшением интенсивности люминесценции<sup>1</sup> наиболее существенно уменьшается краевая полоса (800 нм), связанная, как известно, с рекомбинацией неравновесных носителей в донорно-акцепторных (ДА) парах, в состав которых входит мелкий акцептор — атом щелочного металла на месте Cd [8]. Преимущественное уменьшение интенсивности полосы 800 нм можно объяснить уменьшением концентрации соответствующих ДА-пар, что в свою очередь может быть связано с уходом как донора, так и акцептора. Если бы из ДА-пары уходил донор, то проводимость повысилась бы и вместо ДА-полосы появилась бы полоса, связанная с захватом свободного электрона акцептором, что противоречит экспериментальным данным. Следовательно, уменьшение интенсивности полосы 800 нм связано с уменьшением концентрации акцепторов  $Li_{Cd}$  и  $Na_{Cd}$ .

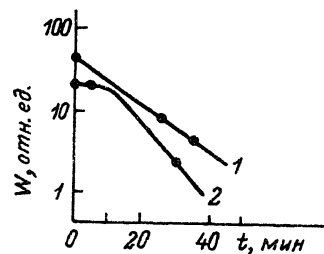
Как отмечалось выше, толщина слоя, в котором сосредоточены дислокации, образовавшиеся при облучении, составляет 3—5 мкм, а толщина кристалла — ~100 мкм. Для того чтобы наблюдалось уменьшение проводимости кристалла, акцепторы должны вытекать на эти дислокации из всего объема кристалла, так как в противном случае объем шунтировал бы высокоомный слой с дислокациями.

Чтобы убедиться в этом, мы измеряли зависимость интенсивности примесной полосы люминесценции 850 нм (при 80 К) от времени выдерживания кристалла после облучения при комнатной температуре. Измерения ФЛ проводились со стороны как облученной, так и противоположной граней. Поскольку свет, возбуждающий ФЛ, поглощается в тонком ( $\sim 10^{-5}$  см) слое кристалла и  $I_T$  коррелирует

<sup>1</sup> Общее уменьшение интенсивности ФЛ при 4.2 К может быть связано с появлением нового излучательного канала рекомбинации, обуславливающего полосу 840 нм.

Рис. 5. Кинетика уменьшения интенсивности фотолюминесценции при 300 К после лазерного облучения.

1 — облученная грань, 2 — противоположная грань.



с  $W$ , изменение  $W$  со временем должно отражать изменение концентрации акцепторов в тонком слое вблизи обеих граней. Оказалось, что уменьшение  $W$  действительно имеет место не только со стороны облученной грани, но и с противоположной, причем изменение в последнем случае наступает позже, чем в первом (рис. 5), и протекает в течение  $\sim 2$  ч, как и уменьшение  $I_T$ .

Таким образом, уменьшение проводимости пластинчатых кристаллов CdTe  $p$ -типа после лазерного облучения с плотностью мощности ниже порога возгонки и плавления обусловлено размножениями дислокаций и стеканием на них акцепторов  $\text{Li}_{\text{Cd}}$  или  $\text{Na}_{\text{Cd}}$  из объема. При этом насыщение зависимости  $I_T(N)$  обусловлено тем, что с ростом  $N$  перестает быть заметной добавка новых дислокаций на фоне образованных ранее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Булах Б. М., Красикова С. М. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1973. Т. 9. В. 7. С. 1112—1116.
- [2] Байдуллаева А., Джумаев Б. Р., Гарягдыев Г., Корсунская Н. Е., Маркевич И. В., Мозоль П. Е. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1989. № 12. С. 129—133.
- [3] Артамонов В. В., Байдуллаева А., Мозоль П. Е., Стрельчук В. В. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 3. С. 91—94.
- [4] Бабенцов В. Н., Байдуллаева А., Булах Б. М., Горбань С. М., Мозоль П. Е. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 12. С. 144—147.
- [5] Лашкарев В. Е., Шейнкман М. К., Любченко А. В. Неравновесные процессы в фотопроводниках. Киев, 1981. 264 с.
- [6] Dean P. J., Williams G. M., Blackmore G. // J. Phys. Appl. 1984. V. 17. N 11. P. 2291—2294.
- [7] Джумаев Б. Р., Гарягдыев Г., Городецкий И. Я., Корсунская Н. Е., Шейнкман М. К. // Тез. докл. Всес. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках. Ташкент, 1989. С. 126.
- [8] Neu G., Marfaing Y., Legros R., Triboulet R., Svob // J. Luminescence. 1980. V. 21. N 3. P. 293—304.

Институт полупроводников  
АН Украины  
Киев

Получена 30.08.1991  
Принята к печати 23.10.1991