

ОСОБЕННОСТИ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СУЛЬФИДА КАДМИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ

О.В. Богданкевич, А.Н. Георгобиани, В.Г. Дюков, О.Д. Кнаб, А.Д. Левит, В.Б. Митюхляев, Е.И. Панасюк, О.Е. Струмбан, П.А. Тодуа, В.Н. Файфер

УДК 535.376

Обнаружено увеличение интенсивности катодолюминесценции тех локальных областей кристаллов, которые подвергались после облучения протонами ($E_p = 150$ кэВ, $\Phi_p \sim 10^{13} \div 10^{16}$ см $^{-2}$) воздействию электронного зонда с энергией $E_e \geq 10$ кэВ и дозой $\sim 10^{18} \div 10^{19}$ см $^{-2}$.

Исследовались монокристаллы сульфида кадмия, выращенные из паровой фазы по методу, являющемуся модификацией метода Маркова - Давыдова /1/. Полученные кристаллы n-типа при $T = 300$ К обладают удельным сопротивлением ~ 10 Ом·см и подвижностью электронов ~ 300 см 2 /В·с.

Монокристаллы нарезались в виде плоскопараллельных пластин размером $10 \times 5 \times 1$ мм 3 , ориентированных большой плоскостью перпендикулярно оси с кристалла. Образцы механически полировались и подвергались травлению в 40% HCl + CrO $_3$ (1 : 1,5) в течение 10 минут с дальнейшей промывкой в дистиллированной воде и спирте.

Энергия протонов при облучении E_p составляла 150 кэВ, доза ступенчато варьировалась от образца к образцу в пределах $\Phi_p \sim 10^{13} - 10^{16}$ см $^{-2}$. Облучение производилось при температуре мишеней, равной 300 К.

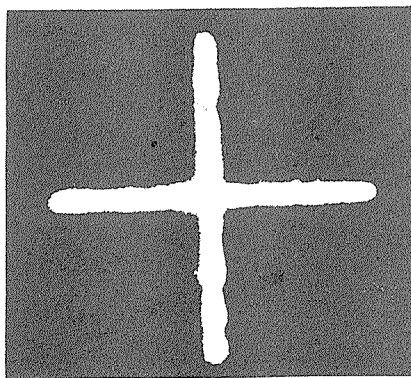
Спектры катодолюминесценции ($E_e = 10$ кэВ, плотность тока пучка 10^{-2} А/см 2 , $T = 80$ К) образцов до облучения протонами содержат только интенсивную экситонную полосу с максимумом при 488 нм и краевую зеленую с четко разрешаемой структурой (максимумы при 518 нм и 526 нм) /2/. При указанных параметрах электронного возбуждения интенсивность экситонной полосы на два порядка выше интенсивности зеленой, что свидетельствует о высокой излучательной способности выращенных кристаллов /2/.

После облучения протонами резко падает интенсивность экситонной и краевой полос катодолюминесценции и появляется широкая красная полоса, не наблюдавшаяся в исходном материале. Положение максимума этой по-

лосы зависит от дозы имплантированных протонов, а именно, по мере увеличения дозы от 10^{13} см^{-2} до 10^{16} см^{-2} максимум от 700 нм смещается в более коротковолновую сторону к 630 нм.

Влияние воздействия электронного зонда на эффективность излучательной рекомбинации в имплантированных образцах изучалось следующим образом. Электронный зонд растрового электронного микроскопа (РЭМ) либо фокусировался в локальной области образца (определяемой геометрией пучка), либо перемещался вдоль заданного направления. Время воздействия подбиралось таким, чтобы в каждой точке обрабатываемой поверхности кристалла набиралась доза электронов $\sim 10^{18} - 10^{19}$ см^{-2} . Обработка образцов электронным зондом производилась как при комнатной, так и при азотной температурах. После этого электронный зонд (без изменения его энергии и плотности тока) переключался в режим скоростного сканирования поверхности образца по растру — так называемый режим катодOLUMИнесценции РЭМ при сканировании по растру. Оказалось, что эффективность катодOLUMИнесценции различных областей кристалла существенно зависит от предистории, а именно, те микрообласти, которые предварительно облучались электронным зондом, люминесцируют значительно интенсивнее, нежели необлученные.

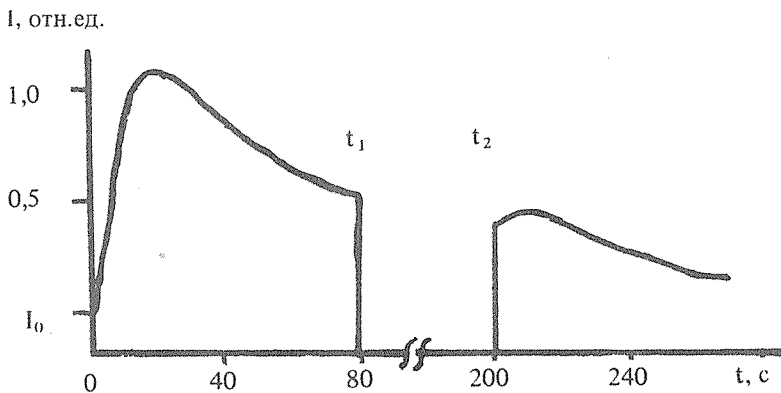
На рис. 1 приведена микрофотография поверхности образца в режиме катодOLUMИнесценции РЭМ (без спектральной селективности). Из соотноше-



Р и с. 1. Снятая в режиме сканирования по растру микрофотография катодOLUMИнесценции поверхностного слоя CdS, облученного протонами ($\Phi_p \sim 10^{15}$ см^{-2}); размер креста 40×40 $\mu\text{м}$. Ярко люминесцируют области, подвергшиеся предварительному локальному воздействию электронного зонда диаметром ~ 1 $\mu\text{м}$ с током $\approx 5 \cdot 10^{-8}$ А, энергией $E_e = 25$ кэВ, скоростью перемещения 1 $\mu\text{м}/\text{с}$; $T = 300$ К

ния $k = (I_1 - I_0)/(I_1 + I_0)$, где I_1 и I_0 — интенсивности катодолюминесценции микрообластей кристалла, предварительно подвергшихся и не подвергшихся воздействию электронного зонда, можно определить контраст изображения. Максимальному значению контраста $k_{\max} = 0,8$ ($I_1/I_0 = 10$) при $T = 300$ К и $k_{\max} = 0,5$ ($I_1/I_0 = 3$) при $T = 80$ К соответствует доза протонов $\Phi_p \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 2 приведена зависимость интегральной интенсивности катодолюминесценции от продолжительности возбуждения электронным зондом, фиксированном в локальной области образца, не подвергавшейся предварительному воздействию электронов. Зонд включался дважды: в момент времени $t = 0$ и в момент времени t_2 . Следует заметить, что повторному включению зонда по сути дела отвечает катодолюминесценция области, подвергшейся обработке электронами (в течение времени первоначального включения). На первый взгляд кажется, что характерные времена разгорания люминесценции в обоих случаях примерно одинаковы. Однако на самом деле, при повторном включении кривая разгорания состоит из двух участков. Начальный участок с большой крутизной отвечает собственно разгоранию люминесценции области, подвергшейся первоначальному воздействию электронного зонда. Далее этот участок переходит в плавно нарастающий с меньшей крутизной, обусловленный добором дозы при повторном включении зонда.



Р и с. 2. Временные зависимости интенсивности катодолюминесценции облученного протонами CdS ($\Phi_p \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$) при фиксированном положении электронного зонда ($E_c = 25$ кэВ, диаметр ~ 1 мкм, ток $\approx 5 \cdot 10^{-8}$ А); $T = 300$ К

Подобного рода временная зависимость катодолюминесценции наблюдалась в GaN, легированном Zn [3], при плотностях тока $\sim 10^2$ А/см², что на три порядка больше, нежели в случае CdS, облученного протонами.

При температуре жидкого азота время разгорания люминесценции при первоначальном включении зонда того же порядка, что и при $T = 300$ К, а при повторном включении (и последующих) примерно на порядок меньше.

Обнаружено, что в диапазоне токов электронного зонда 10 – 100 нА (диаметр зонда ~ 1 мкм, $E_e = 25$ кэВ) время разгорания катодолюминесценции обратно пропорционально току. При этом максимальный контраст определяется как током пучка, так и дозой электронов, набираемой при первоначальном облучении.

Для определения влияния температурного разогрева при облучении образцов электронами нами осуществлялось облучение кристаллов электронным пучком и в импульсном режиме с длительностью импульса 50 нс, скважностью $4 \cdot 10^5$, $E_e = 40$ кэВ и плотностью тока 20 А/см². Заметный контраст появлялся после 30-минутного воздействия, что соответствует дозе электронов $\Phi_e \sim 10^{18}$ см⁻². В таком режиме температура локальной области кристалла, взаимодействующей с электронным пучком, увеличивалась не более, чем на десять-двадцать градусов, что позволяет исключить роль термического отжига.

Установлено, что эффект предварительного воздействия электронного зонда сохраняется в течение длительного времени, а именно, контраст изображения, считываемого в режиме катодолюминесценции РЭМ по прошествии трех - четырех месяцев после электронной обработки, не испытывает тенденции к уменьшению.

Обнаружено, что влияние предварительного облучения электронами можно снять путем 15-минутного прогрева образцов при 100 °С. После такой операции "стирания" записанного изображения можно "записать" новое с не меньшим значением контраста.

В монокристаллах CdS, облученных ионами гелия и аргона, эффект памяти нами не наблюдался.

Увеличение эффективности катодолюминесценции облученных протонами образцов CdS за счет предварительного облучения электронным зондом нельзя объяснить простым залечиванием собственных дефектов. Действительно, в таком случае эффект должен был бы проявляться и в монокристаллах, облученных ионами инертных газов, когда создаются именно собственные дефекты. Кроме того, при залечивании дефектов полностью исключается возможность многократной "перезаписи" информации.

По-видимому, природа обнаруженного явления связана с процессами,

происходящими с участием глубоких уровней и (или) в i - n переходе, образованном облученной областью и низкоомной подложкой.

Поступила в редакцию 9 декабря 1983 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.В. Марков, А.А. Давыдов, Изв. АН СССР, сер. Неорганич. материалы, 11, 1755 (1975).
2. А.Н. Георгобiani и др., Тезисы 7-й Межд. конф. "Ионная имплантация в полупроводниках и других материалах", Вильнюс, 1983 г., с. 369.
3. Г.В. Сапарин и др., Вестник МГУ, сер. 3, физика и астрономия, 24, 56 (1983).