

ИОНИЗАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ДВИЖЕНИЕ СВЕТЯЩИХСЯ ПЯТЕН В КРИСТАЛЛАХ $\text{Na}_2\text{ZnGeO}_4 - \text{Mn}$

М. В. Фок, Е. Ю. Львова

Кристаллы $\text{Na}_2\text{ZnGeO}_4 - \text{Mn}$ возбуждались, как и в [1], постоянным напряжением V при 50°C . Было обнаружено, что при $V \approx 1 \text{ кВ}$ (длина кристаллов $5 \pm 6 \text{ мм}$) у катода возникает яркое зеленое пятнышко, размером $\sim 0,5 \text{ мм}$, которое движется к аноду со скоростью $\sim 4 \cdot 10^{-2} \text{ см/сек}$. Ток при этом равен $\sim 10 \text{ мкА}$ и становится нестабильным. С ростом V возникает несколько таких пятен, а затем становятся видны целые светящиеся области причудливой формы. Обнаруженное явление очевидно относится к одному из видов электрических неустойчивостей. Медленность движения светящегося пятна показывает, что в этом процессе участвуют глубокие уровни. Уровни равные $\sim 1 \text{ эВ}$ были найдены в этих кристаллах по спектру фотопроводимости. По знаку термоэдс кристаллы были n -типа. Донором в них является Mn на месте Na , вызывающий дополнительные полосы фотолюминесценции [2]. Оценка концентрации доноров N_d по относительной яркости этих полос дает $N_d \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Акцептором может быть имеющийся в кристаллах Al , если он замещает Ge . Тогда N_a будет того же порядка.

С рекомбинацией через глубокие уровни связаны рекомбинационная и температурно-электрическая неустойчивости. Однако, объяснить наб-

людаемое явление с их помощью нельзя, так как для их возникновения требуется непрерывная генерация свободных носителей заряда обоого знака. Тепловая генерация здесь полностью исключается, так как запрещенная зона этих кристаллов $E_G = 3,8 \text{ эв}$, а подсветка отсутствует. Вместо нагревания проводимость можно увеличить, если освещать кристалл квантами $1,2 \text{ эв}$, но и они не могут вызвать межзонных переходов.

Появление медленно движущегося светящегося пятна можно объяснить возникновением небольшой области сильного поля между слоями положительного и отрицательного заряда. Эти заряды локализованы на донорах и акцепторах. Электроны, проходя сквозь область сильного поля, могут поддерживать эти заряды и вызывать ударную ионизацию решетки. Возникающие при этом дырки выходят из области сильного поля со стороны катода и рекомбинируют там с электронами, давая видимое свечение.

Расчет показывает, что при реальном соотношении размеров пятна и длины кристалла на слой пространственного заряда приходится примерно $0,05 \text{ В}$, т. е. $\sim 50 \text{ в}$. Поле в нем достигает $2 \cdot 10^6 \text{ в/см}$. В таком поле распределение электронов по энергиям определяется ударной ионизацией решетки, так как скорость потери энергии на рождение фононов в 100 раз меньше скорости приобретения энергии в сильном поле. На пути электрона, где он может приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации решетки, вероятность его взаимодействия с примесью всего несколько процентов. Согласно расчету, верхняя граница распределения E_{max} на $2 - 3 \text{ эв}$ порога ударной ионизации решетки и равна $6 + 8 \text{ эв}$. При столь большой E_{max} электроны могут ионизовать донор не только в области сильного поля, но и выйдя из нее, хотя из-за взаимодействия с фононами они быстро теряют способность ионизовать решетку. Оценка показывает, что горячий электрон может ионизовать донор вне области сильного поля в слое толщиной $\sim 0,5 \text{ мкм}$. Это приводит к распространению слоя положительного пространственного заряда в сторону анода. Нижнюю границу распределения электронов можно оценить так. Электрон совершает ударную ионизацию, имея избыток энергии ΔE над E_G в несколько электронвольт, который распределяется между двумя электронами и дыркой. Оценка показывает, что в среднем на одну частицу приходится $1 + 1,5 \text{ эв}$. Таким образом, средняя энергия электронов в сильном поле $E_{\text{ср}} = 4 \text{ эв}$, причем тепловых электронов почти нет.

Помимо ударной ионизации решетки и доноров в сильном поле возможна еще и ударная деионизация доноров с пороговой энергией $\sim 3 \text{ эв}$. При $E_{\text{ср}} = 4 \text{ эв}$ ее вероятность сравнима с вероятностью ударной ионизации доноров. Поэтому в области наиболее сильного поля число электронов на донорах определяется конкуренцией ударной ионизации доноров и их ударной деионизации. Это приводит к появлению заметного числа нейтральных доноров N_g^0 . Отрицательный пространственный заряд возникает там, где N_g^0 больше ее равновесной величины. Поэтому он будет возникать вновь со стороны анода по отношению к уже существующему, так как поле максимально как раз в середине двойного слоя. В то же время со стороны катода он будет постепенно рассасываться, ибо здесь поле меньше и значит ударная деионизация доноров не происходит. Поэтому слои зарядов обоого знака будут двигаться к аноду. Следом за ними будет двигаться и светящееся пятно.

Возникновение этого пятна у катода обусловлено тем же механизмом, что и его движение. Действительно, в наших опытах на контактах¹⁾ по-видимому, существовал барьер, так как вольт-амперная характеристика нелинейна даже в области напряжений, где светящиеся пятна еще не возникают. Поэтому сначала почти все напряжение сосредоточено у катода (так как кристаллы были *n*-типа) и там возникнет область сильного поля, в которой начнутся все рассмотренные процессы. Контакты и сами кристаллы были не совсем однородны по поверхности. Поэтому концентрация поля в небольшой части прикатодной области может идти быстрее. В этой части и образуется светящееся пятно, которое затем начинает двигаться к аноду. При этом оно может уменьшаться в диаметре из-за краевых эффектов. Некоторые пятна могут погаснуть, не дойдя до анода, что нередко и наблюдается на опыте.

Независимой проверкой теории может служить оценка эффективного сечения доноров S . Ее можно сделать, зная скорость движения светящегося пятна, плотность тока в нем и толщину слоя вне области сильного поля, в которой происходит ударная ионизация доноров. S получилось равным $3 \cdot 10^{-14}$ см². Все величины, необходимые для этой оценки, были найдены либо из опыта, либо теоретически, но без априорных предположений о параметрах доноров. Учитывая точность, с какой были оценены эти величины, полученную величину эффективного сечения ударной ионизации доноров можно считать вполне разумной.

Таким образом, появление и движение светящихся пятен в кристаллах $\text{Na}_2\text{ZnGeO}_4 - \text{Mn}$ связано с еще одним видом электрической неустойчивости, характерной для сильно компенсированных широкозонных полупроводников с большой концентрацией глубоких доноров. По механизму возникновения этой неустойчивости ее можно назвать ионизационной.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
27 февраля 1971 г.

Литература

- [1] К.А.Верховская и др. ФТТ, 10, 1906, 1968.
- [2] Г.Е.Архангельский, Е.Ю.Львова, М.В.Фок. ЖПС, 14, 97, 1971.

¹⁾ Контакты были прижимными, а также из индия, аквадага, серебра и специальных проводящих эмалей.