

CHƯƠNG 1

CÁC HIỆN TƯỢNG ĐẶC BIỆT CỦA ĐIỆN TỬ TRONG BÁN DẪN III-V

1.1 Hiện tượng điện tử nóng

Hiện tượng *điện tử nóng* (hot electron) là tên gọi chung để chỉ những hiện tượng xảy ra khi điện tử được tăng tốc bởi một điện trường ngoài cao. Một hiện tượng điện tử nóng được biết đến nhiều đó là hiện tượng vận tốc trôi dạt của điện tử sẽ bão hòa khi có điện trường ngoài cao tác dụng vào linh kiện bán dẫn.

Khi các điện tử ở trạng thái cân bằng nhiệt với mạng tinh thể, do điện tử là fermion nên chúng sẽ tuân theo thống kê Fermi-Dirac

$$f_0(\epsilon_k) = \frac{1}{1 + \exp([\epsilon_k - \epsilon_F]/k_B T)} \quad (1.1)$$

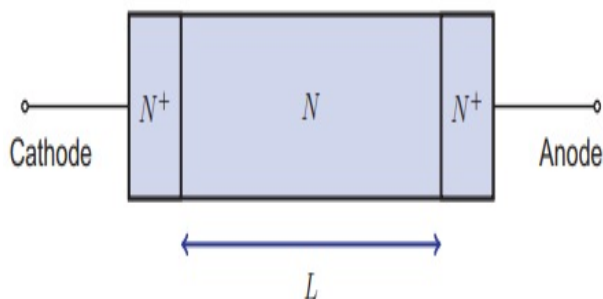
T là nhiệt độ mạng tinh thể, ϵ là năng lượng của điện tử, ϵ_F là năng lượng Fermi, $f_0(\epsilon_k)$ là xác suất để một trạng thái điện tử có năng lượng ϵ_k bị chiếm giữ. Ở nhiệt độ không độ tuyệt đối, các trạng thái sẽ được lấp đầy hoàn toàn từ mức năng lượng thấp nhất cho đến mức Fermi. Dưới điều kiện không cân bằng, chẳng hạn như tác dụng một điện trường ngoài mạnh vào vật liệu, các điện tử trong bán dẫn sẽ được đưa tới những trạng thái có năng lượng cao hơn, tức chúng trở nên *nóng*. Người ta thường đặc trưng cho các điện tử nóng này một nhiệt độ, gọi là *nhiệt độ điện tử* T_e . Đương nhiên $T_e > T$.

Quá trình tìm kiếm những ứng dụng có tính thương mại của hiện tượng

điện tử nóng đã dẫn đến phát hiện ra hiệu ứng Gunn [34] - sẽ được trình bày ở mục 1.2, là cơ sở để tạo ra diode Gunn. Ngoài diode Gunn, còn có diode và transistor chuyển đổi không gian-thực, transistor đạn đạo, transistor kết hợp, laser thác lượng tử, laser điện tử nóng [14].

1.2 Hiệu ứng Gunn

Năm 1963, J. B. Gunn [34] đã quan sát được một kiểu dao động dòng điện có tần số cực cao, lên đến vài GHz trong mẫu bán dẫn GaAs và InP loại n khi có một điện trường ngoài cao, khoảng 2000-4000 V/cm tác dụng. Có tới 1-2% công suất chuyển đổi thành công suất bức xạ vô tuyến đồng thời tần số dao động của dòng điện tỉ lệ nghịch với chiều dài mẫu bán dẫn. Hiệu ứng nói trên thường được gọi là *hiệu ứng Gunn*, nó là nền tảng của một loại thiết bị mới, gọi chung là *diode Gunn*, được sử dụng rộng rãi để tạo ra các bộ dao động phát sóng mm.

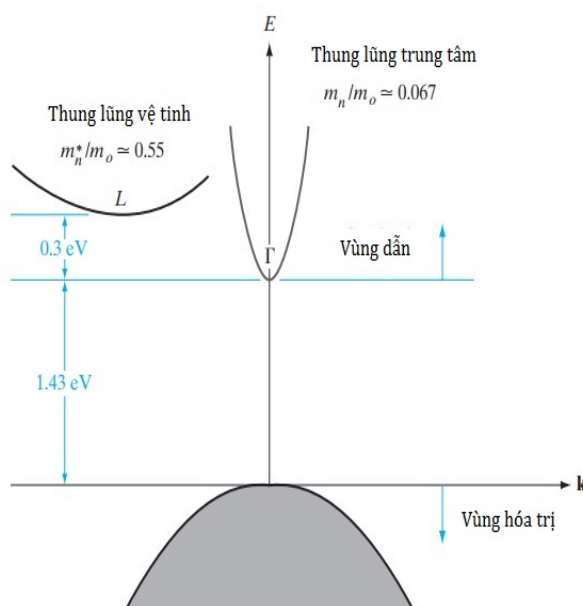


Hình 1.1: Cấu tạo của diode Gunn.

Để giải thích hiệu ứng Gunn, người ta thường dựa vào *cơ chế điện tử chuyển đổi* (transferred-electron effect), hay cơ chế Ridley–Watkins–Hilsum. Theo đó, các electron dẫn của một số chất bán dẫn được chuyển từ trạng thái có độ linh động cao chuyển sang trạng thái độ linh động thấp do ảnh

hưởng của điện trường mạnh. Dưới đây sẽ mô tả quá trình chuyển electron và dẫn đến sự thay đổi tính linh động.

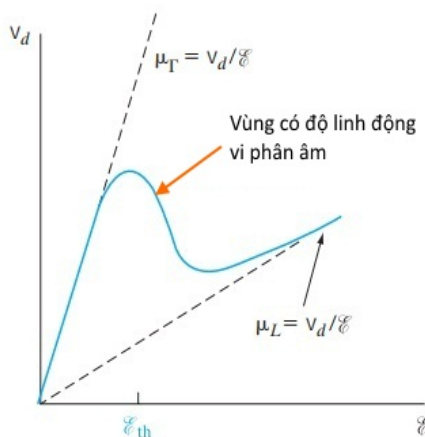
Trong bán dẫn GaAs loại n, vùng hóa trị được lấp đầy và thung lũng trung tâm (hoặc cực tiểu) của vùng dẫn tại Γ thường chứa các electron dẫn. Có một tập hợp các cực tiểu phụ tại L (đôi khi được gọi là thung lũng vệ tinh) ở mức năng lượng cao hơn. Các mức năng lượng này thường không bị chiếm giữ. Nếu đặt một điện trường ngoài cao hơn một giá trị tới hạn nào đó (khoảng 3000 V/cm) vào hai đầu bán dẫn, các electron trong thung lũng trung tâm thu được nhiều năng lượng hơn 0,30 eV, là mức chênh lệch năng lượng giữa hai thung lũng L và Γ , khi đó sẽ có sự tán xạ đáng kể của các electron từ thung lũng Γ vào thung lũng vệ tinh L.



Hình 1.2: Cấu trúc vùng năng lượng được đơn giản hóa của GaAs.

Một khi các điện tử đã nhận đủ năng lượng từ trường để được chuyển vào thung lũng năng lượng cao hơn, chúng vẫn ở đó miễn là điện trường lớn hơn giá trị tới hạn. Giải thích cho điều này là do mật độ trạng thái hiệu dụng tổ hợp của các trạng thái đối với các thung lũng phía trên lớn

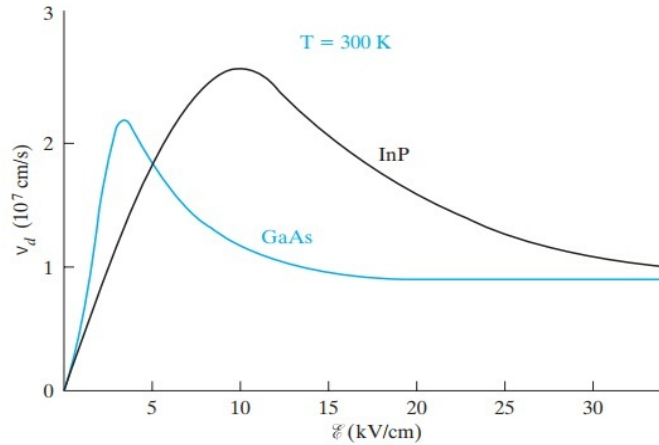
hơn nhiều so với thung lũng trung tâm (gấp khoảng 24 lần). Xác suất tán xạ electron giữa các thung lũng phụ thuộc vào mật độ của các trạng thái có sẵn trong mỗi trường hợp, và sự tán xạ từ một thung lũng có nhiều trạng thái vào một thung lũng có vài trạng thái sẽ không giống nhau. Kết quả là, một khi điện trường ngoài lớn hơn điện trường tới hạn, hầu hết các electron dẫn trong GaAs vẫn nằm trong các thung lũng vệ tinh và thể hiện các đặc tính đặc trưng của vùng đó. Đặc biệt, khối lượng hiệu dụng của electron ở các thung lũng L cao hơn nhiều (gần tám lần) so với khối lượng hiệu dụng của electron ở thung lũng trung tâm và độ linh động của electron tương ứng sẽ nhỏ hơn nhiều.



Hình 1.3: Đường đặc trưng của vận tốc trôi dạt của điện tử theo điện trường ngoài trong cơ chế electron chuyển đổi.

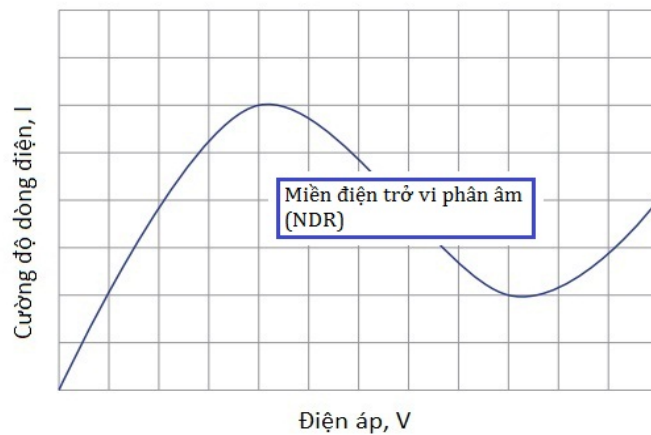
Đối với các giá trị thấp của điện trường, các điện tử nằm trong thung lũng Γ thấp hơn của vùng dẫn và độ linh động cao và không đổi theo điện trường cho đến khi điện trường đạt đến giá trị tới hạn. Khi tăng điện trường, miễn là điện trường vẫn còn nhỏ hơn giá trị tới hạn thì vận tốc sẽ tăng theo. Khi điện trường tăng quá giá trị tới hạn, các electron bắt đầu chuyển đến các thung lũng vệ tinh, tỉ lệ các electron có độ linh động thấp tăng lên và vận tốc trôi dạt của chúng giảm cho đến khi các electron có

cùng độ linh động thấp như nhau, lúc đó vận tốc trôi đạt sẽ ngừng giảm. Giữa hai trạng thái này là một vùng có độ dốc âm trên đồ thị ở Hình 1.3, vùng này biểu thị *độ linh động vi phân âm*.



Hình 1.4: Sự biến đổi của vận tốc trôi đạt của điện tử theo điện trường ngoài trong bán dẫn GaAs và InP.

Việc giảm độ linh động của electron khi tăng điện trường có nghĩa là đối với mẫu vật liệu đang xét, dòng điện chạy qua mẫu sẽ giảm khi tăng điện áp đặt vào mẫu. Người ta gọi hiện tượng trên là *điện trở vi phân âm* (NDR).



Hình 1.5: Đường đặc trưng I-V của diode Gunn.

Nếu bây giờ tăng điện trường lên nữa thì vận tốc trôi đạt của electron sẽ bắt đầu tăng trở lại cho đến khi điện trường đạt tới một giá trị tối hạn

mới để có thể đưa các electron tới mức năng lượng cao hơn. Do vậy, hiện tượng điện trở vi phân âm chỉ xảy ra trong một phạm vi giới hạn của điện trường.

Để kết thúc phần này, nên nhớ rằng để tạo ra hiện tượng điện trở vi phân âm, cần thỏa mãn đồng thời 3 điều kiện sau:

- Nhiệt độ mạng T phải đủ thấp ($k_B T \ll \Delta E_{21}$, ΔE_{21} là độ chênh lệch năng lượng giữa thung lũng vệ tinh L và thung lũng trung tâm Γ , với GaAs thì $\Delta E_{21} = 0,30$ eV) để ở trạng thái cân bằng hầu hết các điện tử sẽ cư trú ở vùng dẫn thấp hơn (Γ). Nếu nhiệt độ quá cao ($k_B T \approx 0,30$ eV) thì các điện tử có thể chuyển lên mức năng lượng cao hơn (L) mà không cần có điện trường tác dụng.

- Độ linh động ở thung lũng thấp hơn thì lớn hơn nhiều độ linh động ở thung lũng cao hơn và mật độ trạng thái ở thung lũng cao hơn lớn hơn nhiều mật độ trạng thái ở thung lũng thấp hơn.

- Độ chênh lệch năng lượng giữa thung lũng vệ tinh L và thung lũng trung tâm Γ bé hơn nhiều bề rộng vùng cấm để cho hiện tượng đánh thủng không xảy ra trước khi các điện tử chuyển lên các thung lũng cao hơn nhờ điện trường tác dụng.