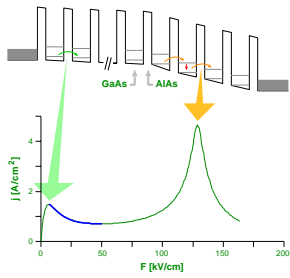


## Das Transportmodell



Die Berücksichtigung von Minibandleitung und resonantem Tunneln sowie intersubband-Relaxation führt zu negativer differentieller Leitfähigkeit (NDC). Dies ermöglicht raumzeitliche Strukturbildung in Transportrichtung; Ausbildung von Domänen des elektrischen Feldes.

## Die Gleichungen

$$\begin{aligned} \dot{n}_1^{(i)} &= \frac{1}{\tau} n_2^{(i)} \\ -X(F^{(i)}) n_1^{(i)} + Y(F^{(i)}) n_2^{(i-1)} \\ + Y(F^{(i+1)}) n_1^{(i+1)} - X(F^{(i+1)}) n_2^{(i+1)} \\ - R_1(F^{(i+1)}) n_1^{(i)} + R_1(F^{(i)}) n_2^{(i-1)} \\ \dot{n}_2^{(i)} &= -\frac{1}{\tau} n_1^{(i)} \\ -Y(F^{(i)}) n_2^{(i)} + X(F^{(i)}) n_1^{(i-1)} \\ + X(F^{(i+1)}) n_2^{(i+1)} - Y(F^{(i+1)}) n_1^{(i+1)} \\ - R_2(F^{(i+1)}) n_2^{(i)} + R_2(F^{(i)}) n_1^{(i-1)} \end{aligned}$$

### Diskrete Poisson-Gleichung:

$$\epsilon(F^{(i+1)} - F^{(i)}) = 1 (n_1^{(i)} + n_2^{(i)} - N_D)$$

### Auftretende Größen:

- $F^{(i)}$ : Feldstärke über der i-ten Barriere
- $n_k^{(i)}$ : Elektronendichte im k-ten Energieniveau des i-ten Quantentopfs

### Transportprozesse:

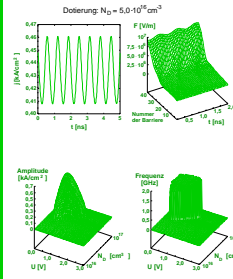
- $X, Y$ : Resonantes Tunneln erstes Niveau  $\rightarrow$  zweites
- Resonantes Tunneln zweites Niveau  $\rightarrow$  erstes
- $R_1$ : Minibandleitung für das i-te Energieniveau

UNGESTÖRT

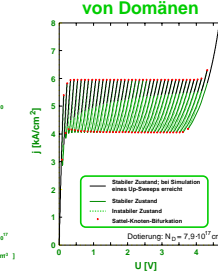
LEICHT GESTÖRT

STARK GESTÖRT

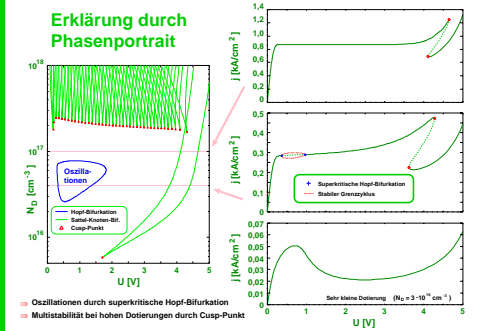
## Bei mittlerer Dotierung: Oszillationen



## Bei hoher Dotierung: Multistabilität von Domänen



## Erklärung durch Phasenportrait



## Räumliche Dotierungsfluktuationen

### Modellierung

Lokale Dotierung für jeden Quantentopf i:  
 $N_D^i = N_D (1 + \alpha \cdot \phi^i)$   
 $\phi^i$ : Fluktuationsrealisierung  
 Zufallszahlen im Bereich [-1;1]  
 $\alpha$ : Unordnungsgrad

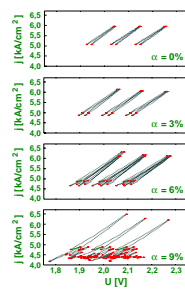
Der Vergleich verschieden stark gestörter Übergitter geschieht durch Veränderung von  $\alpha$ , während die Fluktuationsrealisierung festgehalten wird.

Fluktuationen anderer Größen (z. B. Barrierendicken) sind wahrscheinlich nicht relevant (Vergleich gemessener mit simulierten Kennlinien; PL-Messungen).

### Analytische Betrachtung (bei Existenz von Domänen)

- Feldprofil nur wenig verändert
- Veränderung der Länge und der Höhe der Äste direkt proportional zur lokalen Dotierung
- $\Delta j_{max} \sim \alpha$
- $\Rightarrow$  direkt sichtbar
- Grundstruktur der Kennlinie bleibt erhalten
- aber: Bei Simulation eventuell nicht mehr alle Äste erreichbar

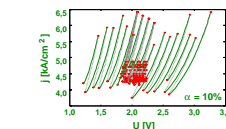
Einfache Aussagen - analytisch oder numerisch - für das Oszillationsregime sind nicht möglich.



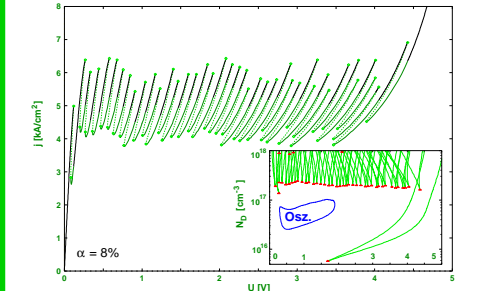
## Weitere stationäre Zustände...

... existieren auch für ungestörte Übergitter. Mit steigender Störung entstehen in Cusp-Punkten jedoch zusätzliche Paare von Sattel-Knoten-Bifurkationspunkten (Abbildungen links).

Übersteigt der Störungsgrad eine bestimmte Schwelle, so können sich in einer gestörten transkritischen Bifurkation die eben beschriebenen Zustände mit der "normalen" Kennlinie verbinden (Abbildung unten).



## Verschwinden von Ästen in Experiment und Simulation

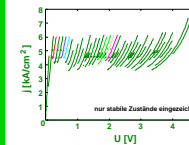


## Weitere Erhöhung...

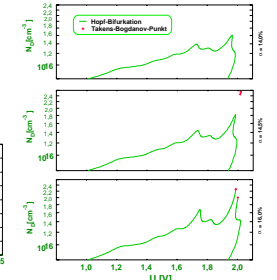
des Störungsgrads führt bei stark dotierten Übergittern zu einer Auftrennung der Kennlinie in mehrere Teilstücke (Abbildung unten).

In stark gestörten Übergittern sind Oszillationen für deutlich stärker dotierte Übergitter möglich.

- Oszillationen bei Feldomänen



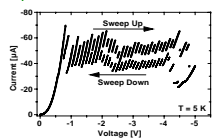
## Oszillationsgebiet



## Zielsetzung

- Raum-zeitliche Strukturbildung: Feldomänen
- Bifurkationstheoretische Erklärung von Multistabilität und Stromoszillationen (Grenzzyklus)
- Beschreibung der Unregelmäßigkeiten experimentell gemessener Strom-Spannungskennlinien
- Abschätzung der Güte experimenteller Proben

### Experimentelle Kennlinie



Ann: J. Weidner, H. T. Grahn, K. Pöngl, F. Pregel, A. Weidner, E. Schöll, Appl. Phys. Lett. 85 (14), 1608 (2004)

## Anmerkungen

### Keine Bestimmung von Wellenfunktionen

#### Modell behandelt stark dotierte Übergitter

- große Anzahl von Dotierungsatomen = Streuzentren
- Kohärenzlänge kleiner als der Abstand zweier Quantentöpfe
- Deswegen ist die Betrachtung von Elektronendichten sinnvoller als die von Wellenfunktionen.

### Dynamische Variablen:

Elektronendichten (pro Energieniveau) in jedem der (typischerweise 40) Quantentöpfe

Dies ist nicht als Diskretisierung einer partiellen Differentialgleichung zu verstehen. Die Elektronendichten in den einzelnen Quantentöpfen haben eine physikalische Begründung und Bedeutung.

Die in der Kennlinie sichtbare Aststruktur beruht gerade darauf, daß sich Ladungsträger nur an diskreten Positionen (in den einzelnen Quantentöpfen) befinden können.

- 80-dimensionales System gewöhnlicher DGLs

## Zusammenfassung

- Mechanismen für
  - Multistabilität
  - Entstehung von Stromoszillationen durch Bifurkationstheorie erklärt

Qualitative - eingeschränkt auch quantitative - Aussagen über das Verhalten des Übergitters bei nicht zu starken Störungen

## Weitere Informationen...

WWW: <http://itpl.physik.tu-berlin.de/>

eMail: [patra@physik.tu-berlin.de](mailto:patra@physik.tu-berlin.de)

Verwandtes Poster: "Einfluß wachstumskorrelierter Unordnung auf die Domänenbildung in Halbleiter-Übergittern"

HL 16.98, Dienstag, 10:30 Uhr, Posterfläche A

## Ausblick

- Experimentelle Verifizierung durch Wachsen gezielt gestörter Übergitter ist experimentell noch nicht möglich

- Für Reproduktion auch von Details der experimentell gemessenen Kennlinien ist Modellverbesserung notwendig

- Relevanz der zusätzlichen Zustände bei stark gestörten Übergittern noch ungeklärt